



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



CAIO TORRES DE CASTRO

**PROPOSTA DE REDUÇÃO DA VARIABILIDADE DO TEOR DE FERRO NA
ALIMENTAÇÃO DO PRIMEIRO ESTÁGIO DA CONCENTRAÇÃO MAGNÉTICA
ATRAVÉS DA METODOLOGIA LEAN SEIS SIGMA**

**OURO PRETO - MG
2021**

CAIO TORRES DE CASTRO

caio.torres@aluno.ufop.edu.br

**PROPOSTA DE REDUÇÃO DA VARIABILIDADE DO TEOR DE FERRO NA
ALIMENTAÇÃO DO PRIMEIRO ESTÁGIO DA CONCENTRAÇÃO MAGNÉTICA
ATRAVÉS DA METODOLOGIA LEAN SEIS SIGMA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentada ao Curso de Graduação em
Engenharia de Minas da Universidade
Federal de Ouro Preto como requisito para a
obtenção do título de Engenheiro de Minas.

Professor orientador: Dr. Vladimir Kronemberger Alves

**OURO PRETO – MG
2021**

C355p Castro, Caio Torres de.

Proposta de redução da variabilidade do teor de ferro na alimentação do primeiro estágio da concentração magnética através da metodologia Lean Seis Sigma. [manuscrito] / Caio Torres de Castro. - 2021. 56 f.

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Kronenberger Alves.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Ferro - Minas e mineração. 2. Quadrilátero Ferrífero (MG). 3. Beneficiamento de minério. 4. Administração da produção - Controle de Qualidade - Seis Sigma. I. Alves, Vladimir Kronenberger. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.765.5

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Caio Torres de Castro

Proposta de Redução da Variabilidade do Teor de Ferro na Alimentação do Primeiro Estágio da Concentração Magnética Através da Metodologia Lean Seis Sigma

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Minas

Aprovada em 27 de Maio de 2021

Membros da banca

Doutor - Vladimir Kronemberger Alves - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Engenheiro - Luiz Otávio Graçano Castro - (Ferro+ Mineração S.A)
Engenheiro - Tonimar Mendes de Oliveira - (OP3)

Vladimir Kronemberger Alves, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 03/06/2021



Documento assinado eletronicamente por **Vladimir Kronemberger Alves, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/06/2021, às 14:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0178636** e o código CRC **52BA6A0D**.

À minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela dádiva da vida e ao universo por conspirar ao meu favor. Aos meus pais Geraldo e Cristina pelo apoio e incentivo desde o início da graduação.

À minha irmã Lorena por se fazer sempre presente e por todo carinho de sempre.

À Monize por todos os momentos compartilhados, por estar caminhando ao meu lado em todos nossos desafios e felicidades com muito carinho, amor e companheirismo.

Aos amigos de Ouro Preto e Juiz de Fora por todos bons momentos vividos. “Quem tem amigos, tem tudo”.

À Universidade Federal de Ouro Preto, DEMIN e todos os professores, pelo ensino gratuito e de excelente qualidade.

Ao meu orientador Dr. Vladimir Kronemberger Alves, pela condução de sua orientação, amizade e confiança neste estudo.

À Ferro+ Mineração S.A, em especial a equipe de operação de mina, pela oportunidade e confiança no começo da minha vida profissional. Em especial: Flausino, Parreira, Reinaldo, Ely, Sidnei, Márcio, Thiago, Natã, Wesley, Rodrigo, Luiz, Bruno, Rafael, João, Fernando e Zaqueu.

Aos meus irmãos Republicanos da gloriosa República dos Deuses.

“Prefiro a incerteza do saber à certeza do não saber”

RESUMO

A indústria de mineração de ferro tem por excelência a necessidade de fornecer concentrados dentro dos padrões exigidos pela indústria metalúrgica, em termos de granulometria e teores dos elementos presentes. Entretanto as principais jazidas de minério de ferro inseridas no Quadrilátero Ferrífero apresentem um exaurimento progressivo de minerais ricos em ferro. Deste modo, surge a necessidade em beneficiar minerais mais pobres em teores de ferro e com liberação em faixas granulométricas cada vez mais finas. Tendo em vista este contexto, a indústria mineral deve se adequar empregando novas tecnologias, técnicas, equipamentos e metodologias para permanecerem competitivas no mercado. Este estudo foi desenvolvido a partir de dados fornecidos pela empresa Ferro+ Mineração S.A., e surgiu de uma proposta de redução da variabilidade do teor de ferro na alimentação do primeiro estágio da concentração magnética utilizando a metodologia Lean Seis Sigma, desenvolvida no controle operacional da mina. O presente estudo busca analisar como ações oriundas da metodologia de melhoria contínua contribuíram efetivamente para a redução de aproximadamente 24% da variabilidade do teor de ferro alimentado no primeiro estágio da concentração magnética.

Palavras-chave: Mineração, Quadrilátero Ferrífero, Concentração Magnética, Lean Seis Sigma.

ABSTRACT

The iron mining industry is expected to deliver at the highest quality exceeding expectations of its concentrates when supplying the metallurgical industry, in terms of granulometry and contents of the elements present. However, the main deposits of iron ore inserted in the Quadrilátero Ferrífero show a progressive depletion of minerals rich in iron. Thus, there is a need to benefit minerals that are poorer in iron content and released in increasingly thin granulometric bands. In view of this context, the mineral industry must adapt itself using new technologies, techniques, equipment and methodologies to remain competitive in the market. This study was developed based on data provided by the company Ferro + Mineração S.A., and developed from a proposal to reduce the variability of the iron content in the feed of the first stage of the magnetic concentration using the Lean Six Sigma methodology, developed in the operational control of the mine. The present study seeks to analyze how actions derived from the continuous improvement methodology effectively contributed to the reduction of approximately 24% of the variability of the iron content fed in the first stage of the magnetic concentration.

Keywords: Mining, Quadrilátero Ferrífero, Magnetic Concentration, Lean Six Sigma.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BIFs – Banded Iron Formation

DMT – Distância Média de Transporte

FFB – Formação Ferrífera Bandada

ITM – Instalação de Tratamento de Minério

KPI – Key Performance Indicator (Indicador Chave de Desempenho)

LSS – Lean Seis Sigma

POP – Procedimento Operacional Padrão

QF – Quadrilátero Ferrífero

ROM – Run Of Mine

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa geológico simplificado do QF com as associações de litofácies do Supergrupo Rio das Velhas.	15
Figura 2: Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero, modificado e simplificado a partir de Dorr (1969).	16
Figura 3: Histograma.	21
Figura 4: Distribuição normal.	22
Figura 5: Boxplot.	23
Figura 6: Matriz Esforço x Impacto	25
Figura 7: Separador magnético tipo carrossel.	28
Figura 8: Concentrador magnético INBRAS.	29
Figura 9: Resultados de amostras bi horárias.	30
Figura 10: Carta controle I-MR Chart.	31
Figura 11: Boxplot resultante do teste two variances.	31
Figura 12: Anderson-Darling normality test.	32
Figura 13: Análise de capacidade.	33
Figura 14: Sipoc.	34
Figura 15: Diagrama de Ishikawa.	35
Figura 16: Matriz Causa x Efeito.	36
Figura 17: Matriz Esforço x Impacto.	37
Figura 18: Controle estatístico do processo.	40
Figura 19: Localização da mina Ouro Preto - Ferro+ Mineração S.A.	41
Figura 20: Ortofoto da mina.	44
Figura 21: Melhoria nas amostragens.	47
Figura 22: Melhoria na coleta de dados espaciais das amostras.	48
Figura 23: Redução da distância das pilhas ao silo 01.	48
Figura 24: Identificação do blend.	49
Figura 25: Software Avenza®.	49
Figura 26: Relatório de comparação de teor de Fe.	50
Figura 27: Relatório de comparação de teor de Fe bi horária.	50
Figura 28: Teste de hipótese two sample t.	51
Figura 29: Boxplot proveniente do teste de hipótese two sample t.	52
Figura 30: Comparativo de desvio padrão.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fórmula química e conteúdo teórico de ferro (em %) dos principais minerais portadores de ferro.	17
Tabela 2: Etapas e atribuições do método DMAIC.....	19
Tabela 3: Quadro Comparativo entre os métodos 5W2H.	26
Tabela 4: Resultados bi-horários.....	27
Tabela 5: Plano de ação 5W2H.....	38
Tabela 6: Especificação de produtos.....	45
Tabela 7: Equipamentos de transporte e carga.....	46
Tabela 8: Equipamentos auxiliares.	46

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos.....	14
1.1.1	Objetivo Geral	14
1.1.2	Objetivos Específicos	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Quadrilátero Ferrífero.....	15
2.2	Metodologia Lean Seis Sigma.....	18
2.2.1	Ferramentas Da Metodologia Lean Seis Sigma	20
2.2.2	Brainstorming	24
2.2.3	Sipoc	24
2.2.4	Diagrama De Ishikawa	24
2.2.5	Matriz Causa E Efeito.....	25
2.2.6	Matriz Esforço e Impacto	25
2.2.7	Método 5W2H.....	26
2.3	Concentração Magnética	26
3	METODOLOGIA.....	30
3.1	Define	30
3.2	Measure	34
3.3	Analyse	37
3.4	Improve.....	38
3.5	Control.....	39
4	ESTUDO DE CASO	40
4.1	Descrição do Empreendimento.....	40
4.2	Caracterização dos Principais Litotipos da Ferro+ Mineração S.A.....	41
4.3	Características Gerais da Operação	44
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
6	CONCLUSÃO.....	51
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

1 INTRODUÇÃO

A crescente alta da competitividade no setor minerário mundial faz com que as mineradoras busquem cada vez mais aperfeiçoarem seus processos a fim de aumentar a eficiência produtiva e reduzir gastos relativos à produção. Atrelado a isso, o progressivo esgotamento dos minerais ricos em teor de ferro inseridos no quadrilátero ferrífero promove uma tendência em empresas do setor, inseridas nesta localidade, a recorrerem a depósitos mais pobres e a adotarem novas tecnologias e metodologias que aumentem a eficiência de seu processo produtivo para viabilizar suas operações.

O minério itabirítico tem sido a principal fonte fornecedora de minério de ferro no estado de Minas Gerais, dado ao fato de que grande parte do minério hematítico já foi extraído. Este recurso mineral é constituído pela alternância entre camadas de óxidos de ferro e sílica, sendo seus principais minerais hematita, magnetita e quartzo (MAIA, 2011; CARVALHO et al., 2014; NASCIMENTO, 2010).

Devido a características como a necessidade de especificação químico-física do produto, inexistência de produtos substitutos, a reduzida quantidade de produtores e a considerável concentração de consumidores, o preço do minério de ferro transacionado no mercado transoceânico é determinado pelo sistema de benchmark. (FRANCO, 2008). Isso significa que o mercado determina o preço do produto. A fim de garantir seu lucro, a empresa tem controle apenas de seu custo produtivo, não possuindo acesso a estratégias disponíveis aos demais setores como diferenciação de produtos e mercados, manipulação de preços e estratégias de marketing direto (como “promoções”) (BRITO, 2018).

Tendo em vista este contexto, a adoção de estratégias gerenciais como a aplicação da melhoria contínua se mostra um caminho muito oportuno para uma empresa que deseja otimizar suas operações. Segundo Rodrigues (2018), o Lean Six Sigma é uma das mais utilizadas por se tratar de uma estratégia gerencial altamente quantitativa e de ótimos resultados. Esta tem como objetivo aumentar essencialmente a performance e a lucratividade das empresas por intermédio da melhoria da qualidade de produtos e processos e do aumento da satisfação de clientes e consumidores.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em analisar a aplicação da metodologia Lean Seis Sigma para a redução da variabilidade do teor de ferro alimentado no primeiro estágio da concentração magnética.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Demonstrar a utilização de ferramentas estatísticas e da metodologia Lean Seis Sigma na identificação e resolução de problemas;
- Fomentar a cultura de melhoria contínua nas operações de mina;
- Evidenciar os ganhos obtidos com as ações tomadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Quadrilátero Ferrífero

O Quadrilátero Ferrífero (QF) é uma região clássica da geologia e da mineração brasileira, que se estende entre as cidades de Belo Horizonte (NW), Itabira (NE), Ouro Preto (SE) e Congonhas (SW) (ROESER, 2010). Localiza-se na porção centro-sudeste do Estado de Minas Gerais, ocupando uma área aproximada de 7.000 km² (figura 1). A designação “Quadrilátero” é função do arranjo geométrico de sua morfoestrutura e foi utilizada em 1933 pelo geólogo Luiz Flores de Moraes Rego, para definir a área onde estão concentradas “As jazidas de ferro do centro de Minas Gerais”, em artigo assim intitulado (MACHADO, 2009).

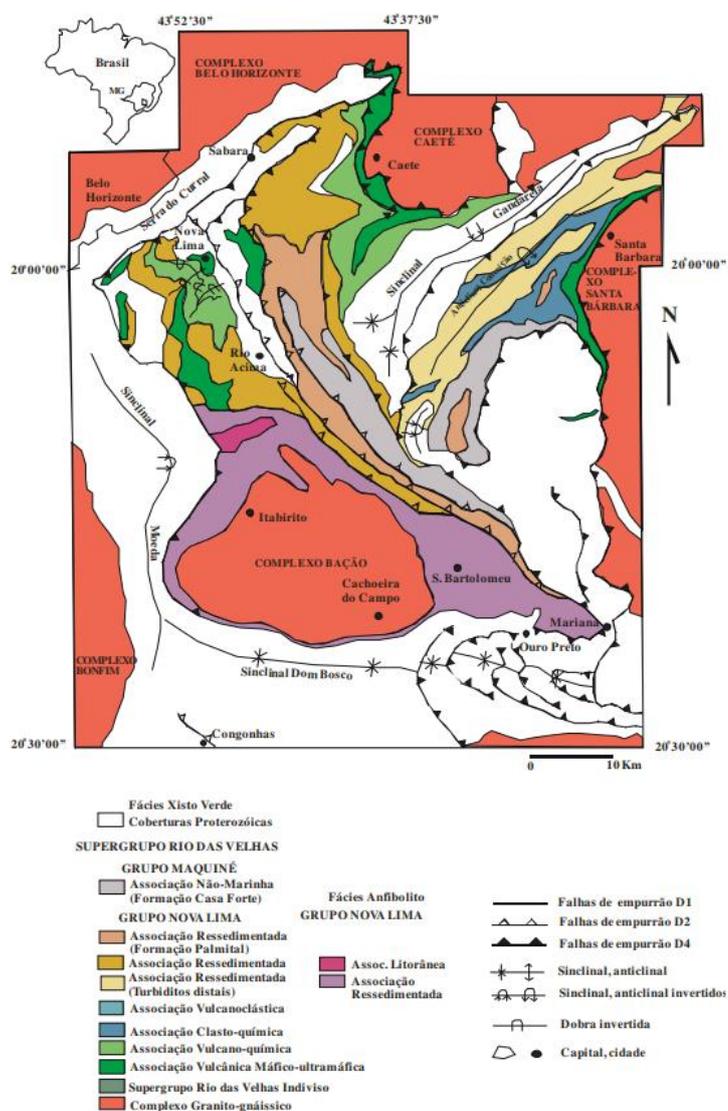


Figura 1: Mapa geológico simplificado do QF com as associações de litofácies do Supergrupo Rio das Velhas.

Fonte: Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos.

O QF está localizado na borda sul do Cráton do São Francisco (ALMEIDA, 1977), uma unidade geotectônica de idade Brasiliana cercada por cinturões orogênicos vergentes para seu interior. É caracterizado pelo arranjo grosseiramente quadrangular de sinclinais onde afloram sedimentos plataformais do Supergrupo Minas, de idade Paleoproterozóica, separados por estruturas antiformais irregulares com terrenos arqueanos do tipo greenstone do Supergrupo Nova Lima, e domos de rochas cristalinas Arqueanas e Proterozóicas, (MACHADO et al. 1992) incluindo granito-gnaisses, metatonalitos a sienogranitos, pegmatitos, anfibolitos, ultramáficas, além de supracrustais metamorfasadas na fácies anfibolito. O Supergrupo Minas inclui quatro grupos: Caraça, Itabira, Piracicaba e Sabará (DORR, 1969).

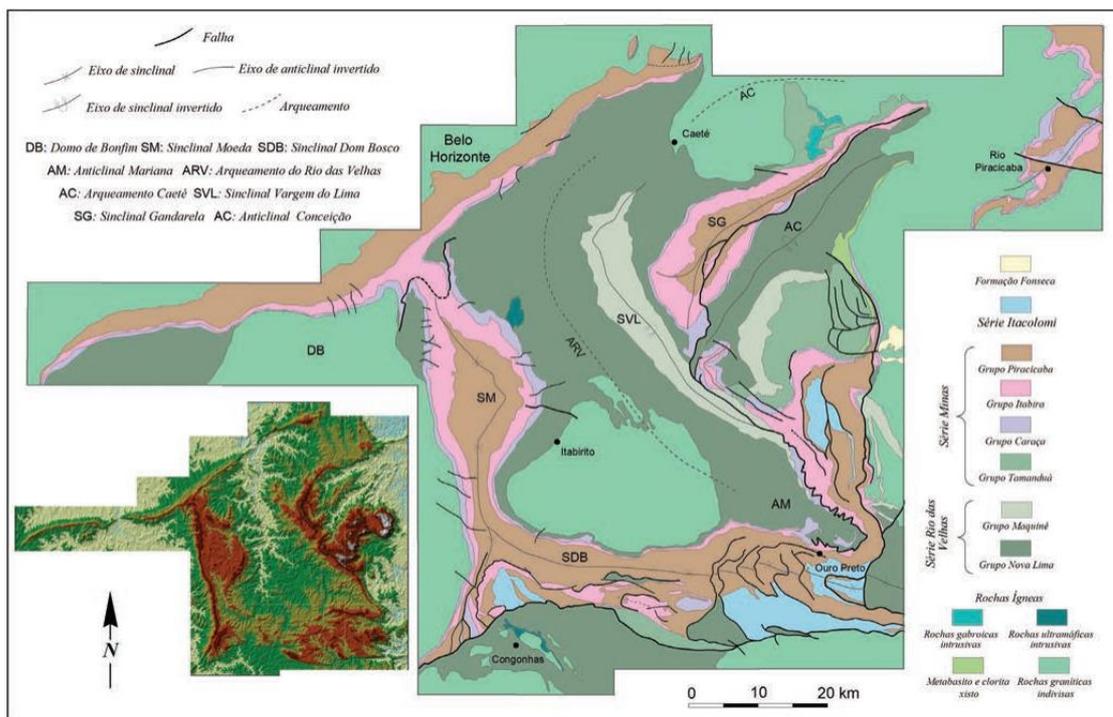


Figura 2: Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero, modificado e simplificado a partir de Dorr (1969).

Fonte: Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos.

Geologicamente, os depósitos de minério de ferro podem ser agrupados em cinco categorias principais: sedimentares acamadados; formados por soluções hidrotermais; relacionados a atividades vulcânicas; relacionados a processos de metamorfismo e/ou deformação; e os resultantes de alteração e acúmulo na superfície terrestre. Dessas categorias, os depósitos sedimentares acamadados são os mais importantes, por constituírem os grandes depósitos das formações ferríferas bandadas (FFB) (CARVALHO et al, 2014).

No Brasil, as principais regiões produtoras de minério de ferro – o Quadrilátero Ferrífero, a Província Mineral de Carajás e a região de Corumbá – contêm depósitos em rochas constituintes de FFB, conhecidas também como BIFs (Banded Iron Formation), chamadas no país de itabirito. (CARALHO et al, 2014).

Ainda de acordo com Carvalho et al (2014), o minério de ferro explorado no QF pode ser dividido em dois grupos: o minério itabirítico (variando entre 20% e 55% de Fe total.) e o minério hematítico (superiores a 64%). As denominações dos minérios de ferro explorados para fins comerciais são as seguintes: itabirito, hematita e canga (cobertura de laterita).

No Brasil, a evolução dos recursos econômicos mostrou um crescimento substancial dos recursos a partir de 1960 até o início dos anos 1980, com a incorporação dos itabiritos às reservas no Estado de Minas Gerais (mudança do perfil de aproveitamento – aglomeração dos minérios finos) e a descoberta da província mineral de Carajás no Pará (investimento em pesquisas geológicas), deixando desta forma um grande potencial para atender as necessidades brasileiras de minério de ferro. (QUARESMA, 2009).

Vencido o desafio tecnológico, hoje se cria fonte de receita a partir dos itabiritos compactos, material duro que precisa ser moído para retirada da sílica que se acumula junto ao ferro (IBRAM, 2008).

Os minérios de ferro economicamente explorados podem ser classificados de acordo com a composição química do mineral fornecedor do elemento metálico. A saber, classificam-se em: óxidos, carbonatos, sulfetos e silicatos. Apenas a exploração dos óxidos tem expressão econômica para a obtenção do ferro. Os principais minerais portadores e seus respectivos teores de ferro são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1: Fórmula química e conteúdo teórico de ferro (em %) dos principais minerais portadores de ferro.

Mineral	Fórmula química	Conteúdo teórico de ferro
Magnetita	Fe_3O_4	72,4
Hematita	Fe_2O_3	69,9
Goethita	$Fe_2O_3 \cdot H_2O$	62,9
Limonita	$2Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$	59,8
Ilmenita	$FeTiO_3$	36,8
Siderita	$FeCO_3$	48,2
Pirita	FeS_2	46,5
Pirrotita	$Fe_{(1-x)}S$	61,0

Fonte: BNDES (2014).

2.2 Metodologia Lean Seis Sigma

O Six Sigma surgiu na Motorola, em meados dos anos 1980, criado a partir de conceitos e métodos propostos por Bill Smith. Utilizando ferramentas conhecidas de qualidade e novos conceitos de gestão, o objetivo do programa era fabricar produtos de qualidade superior a preços menores que seus concorrentes. Com o Six Sigma, a Motorola tornou-se conhecida como líder de qualidade e de lucros (PYZDEK; KELLER, 2010). Grande parcela do “boom” do Seis Sigma deve-se a sua implantação na GE – General Eletric – liderada pelo então CEO e considerado por muitos o maior executivo do século XX, Jack Welch. No Brasil, o Seis Sigma foi disseminado a partir de 1997, quando o Grupo Brasmotor introduziu o programa em suas atividades (WERKEMA, 2012). O Lean, por sua vez, teve as suas origens no produtor automotivo japonês Toyota, derivando de evoluções do Toyota Production System (TPS) (GELDERMAN e WEELE, 2011).

De acordo com Coutinho (2017) a destruição causada pela Segunda Guerra Mundial e a situação econômica desfavorável após o conflito foi o grande motivador para o surgimento desse sistema.

Segundo Womack et al (1992), a produção enxuta apresenta diversas vantagens em relação à produção em massa, tais como menor utilização de mão de obra, menos espaço para fabricação, menor investimento em ferramentas, menor estoque e menos defeitos. Essas vantagens são decorrentes da utilização dos conceitos, sistemas e métodos da produção enxuta.

Com a unificação dessas duas metodologias, o Lean e o Seis Sigma, criou-se a estratégia gerencial Lean Seis Sigma, que representa um processo de melhoria contínua com base nos fundamentos de ambos, e seu objetivo é aumentar expressivamente desempenho e lucratividade das empresas por meio da melhoria da qualidade de produtos e processos.

Dias (2011) corrobora dizendo que o Lean Seis Sigma é uma iniciativa de gestão da qualidade de âmbito organizacional focalizado em atingir resultados concretos e tangíveis, melhorar a qualidade dos processos, tornar processos mais eficientes e criar valor acrescentado, focando na eliminação de problemas de qualidade crônicos e no desperdício em processos.

A implementação da metodologia Lean Seis Sigma envolve uso de etapas focadas na melhoria contínua, e um dos modelos adotados é o DMAIC composto por cinco etapas (tabela 2), a saber, Definir (Define), Medir (Measure), Analisar (Analyze), Melhorar (Improve) e

controlar (Control), consiste em uma ferramenta gerencial utilizada para aperfeiçoar processos já existentes.

Nesta metodologia, são definidos os objetivos de melhoria do processo de acordo com as estratégias da empresa e a demanda dos clientes. Em cada uma das etapas DMAIC, são utilizadas diversas ferramentas como brainstorming, gráfico de Pareto, análise econômica, diagrama de causa e efeito, diagrama de Ishikawa, boxplot, histograma, 5W2H etc. Os processos são então mapeados e medidos de acordo com os dados coletados no processo. Os dados coletados são submetidos a uma verificação com o intuito de realizar uma comparação com as metas objetivadas. Melhorias e controles nos processos são realizados para garantir melhor desempenho das organizações.

Tabela 2: Etapas e atribuições do método DMAIC.

Etapas	Atribuições
Definição (Define)	Identificar qual processo será estudado, quais são seus limites de abrangência, seu cliente e o que é defeito para o produto deste processo.
Medição (Measure)	Elaboração do mapa de processo, identificando todos os sub-processos e etapas do processo-chave anteriormente definidas.
Análise (Analyse)	Selecionar as etapas de desempenho inferior e cuja melhoria promoverá um maior retorno econômico.
Melhoria (Improve)	Utilizando-se de ferramentas como o projeto de experimentos e técnicas de otimização, são estabelecidos limites ótimos de tolerância para as variáveis de entrada, minimizando a variabilidade das variáveis de saída a que se referem.
Controle (Control)	Realiza-se uma forma de controle estatístico sobre as variáveis de entrada de forma que permaneçam dentro dos limites operacionais especificados na etapa anterior. Além disso é efetuado um plano de controle estabelecendo as variáveis de entrada a serem controladas, forma de controle e medição, frequência de coleta de dados e os limites ótimos de trabalho.

Fonte: Adaptado de Werkema (2006).

2.2.1 Ferramentas Da Metodologia Lean Seis Sigma

2.2.1.1 Análise Estatística

Coletar e organizar dados de um processo auxilia na compreensão do comportamento e das tendências de um determinado fluxo. Este compilado resulta em um banco de dados que pode ser utilizado na avaliação de resultados. A análise deste banco de dados faz parte de um processo de gerenciamento de projeto de otimização e padronização.

2.2.1.2 Dados Discretos

Também conhecidos como atributos. São resultados do uso de uma ferramenta do tipo “passa/não-passa”, de uma inspeção visual de defeitos, problemas visuais, partes faltantes, ou ainda de decisões passou/falhou. A definição matemática é que entre dois pontos quaisquer há um número finitos de pontos.

2.2.1.3 Dados Contínuos

Também conhecidos como variáveis. São os resultados da medição de alguma característica como a impedância de um motor, o diâmetro de um tubo, peso de uma pessoa, tempo de uma atividade etc. Matematicamente podemos falar que entre dois pontos quaisquer haverá infinitas possibilidades de outros pontos.

2.2.1.4 Histograma

Histograma é a representação gráfica da distribuição das frequências no formato de barras, onde a base da barra representa o intervalo de valores estudados e a altura representa a frequência de ocorrência dos valores dentro do intervalo. Serve para estudar a distribuição de dados variáveis e verificar o formato de distribuição. Histogramas são frequentemente usados quando se está iniciando um estudo de uma variável, para aumentar o entendimento de seu comportamento. Esta ferramenta é especialmente útil nas fases de medição, análise e controle da metodologia seis sigma.

Um histograma mostra qual o valor central produzido pelo processo, a forma e tamanho da dispersão a cada lado do valor central. O formato e a dispersão poderão te auxiliar a identificar fontes escondidas de variação. Os dados utilizados para coletar um histograma também poderão ser utilizados para o cálculo da capacidade deste.

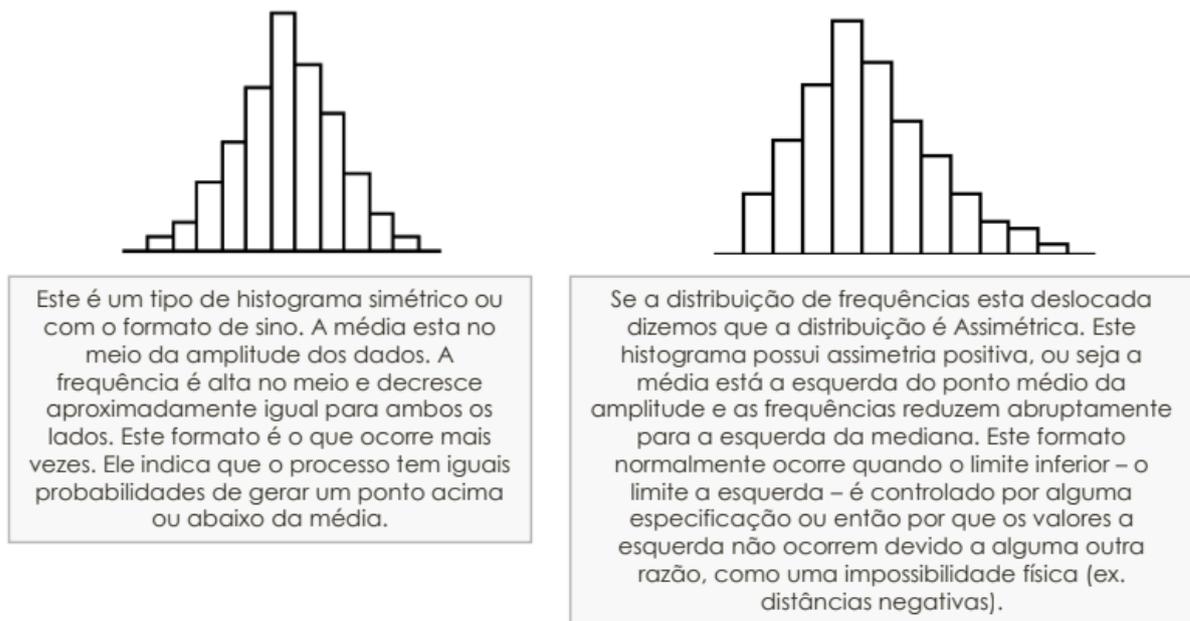


Figura 3: Histograma.

Fonte: Lean Six Sigma Pocket Book (2005).

2.2.1.5 Teste De Normalidade

Há várias formas de se verificar se uma determinada distribuição contínua é normal ou não. A mais simples é desenhar o histograma e verificar se tem formato de sino, que, no entanto, é muito subjetiva. Outra forma que é o Papel Normal, que caso o gráfico obtido seja próximo de uma reta podemos dizer que a distribuição é normal, que novamente é subjetivo. Para resolver este problema temos um teste de hipótese, onde se testa se a distribuição é normal ou não. O mais utilizado é o Teste Anderson-Darling (“default” do Minitab®) que é um teste baseado na função distribuição cumulativa empírica. Ele dá como resultado um valor “p”. Se este valor de “p” é menor do que 0,05 há fortes evidências de que a distribuição dos dados não segue uma distribuição normal. Se o valor de “p” for maior do que 0,05 então a distribuição é

considerada normal. Quando o p-value é menor que 0,05 analisamos o comportamento do histograma e o A-Squared, se este for menor que 30 e o comportamento do gráfico se assemelha ao formato de um sino podemos concluir que a distribuição contínua é normal.

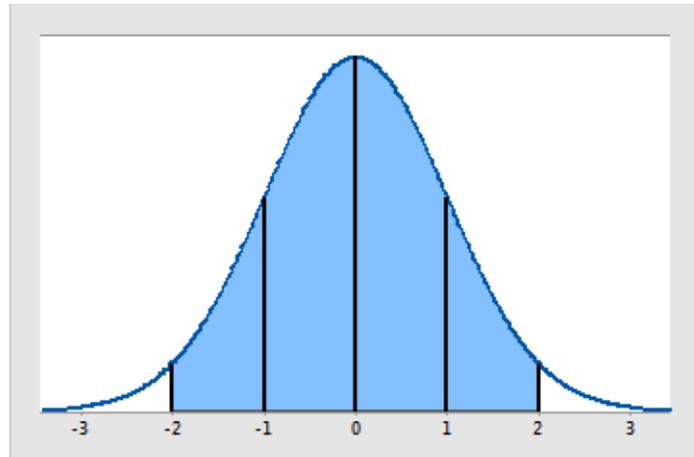


Figura 4: Distribuição normal.

Fonte: Suporte Minitab.

2.2.1.6 Boxplot

Representação gráfica que permite comparar o comportamento da saída do processo (Y) contínua para diferentes níveis de uma potencial fonte de variação (X) discreta. O Boxplot funciona como se fosse uma “vista de topo” da distribuição, permitindo tanto avaliar a tendência central quanto a dispersão da distribuição.

Se utiliza o Boxplot para avaliar a influência de uma potencial fonte de variação (X) sobre a saída do processo (Y), para se avaliar se existe diferenças nas dispersões dos dados.

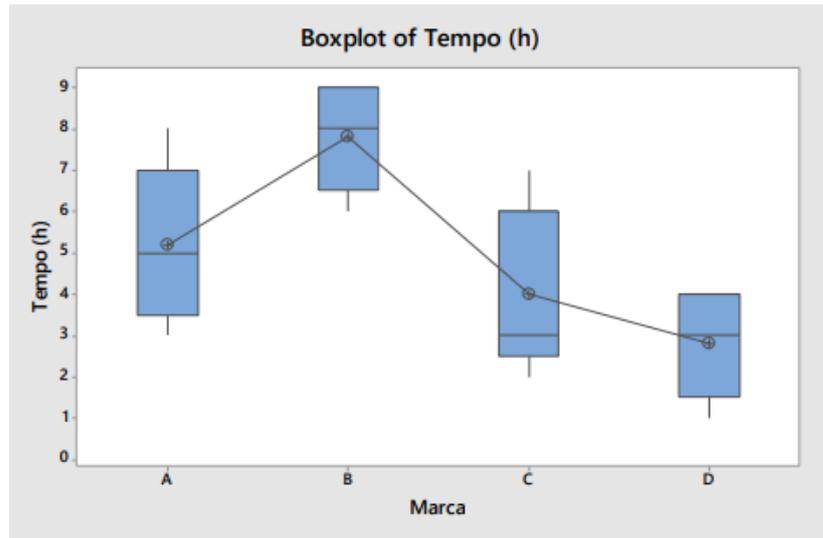


Figura 5: Boxplot.

Fonte: Lean Six Sigma Pocket Book (2005).

2.2.1.7 Capabilidade

O nível sigma também é conhecido como z de benchmarking por servir de parâmetro para a aferição de desempenho do processo antes e depois do projeto Lean Seis Sigma. Esse indicador representa o número de desvios padrão do qual o limite de controle se afasta da média e traduz defeitos produzidos por oportunidades (GEORGE, 2004). Seu cálculo pode ser feito por meio da Equação 1:

$$z = \frac{X - \mu}{\sigma} + 1,5$$

Onde:

z: Nível sigma

X: Limite de controle do processo

μ : Média da amostra

σ : Desvio padrão da amostra

Alguns softwares, a exemplo do Minitab®, utilizam apenas o primeiro termo da equação 1 para o cálculo do z de benchmarking. Porém este representa a variação somente entre os subgrupos, também conhecida como variação de curto prazo, que não leva em consideração a descentralização que o processo sofre com o decorrer do tempo. Assim, para avaliar a variação de maneira completa, deve-se aplicar a Equação 2 (VOITTO, 2014):

$$\text{Nível sigma} = z + 1,5$$

2.2.2 Brainstorming

Werkema (2004) refere que o brainstorming constitui uma ferramenta de suma importância para a produção de um número elevado de ideias sobre um tópico de interesse, num curto período. A autora propõe cinco regras para a condução de uma sessão de brainstorming: deve ser escolhido um líder para coordenar as atividades do grupo, todos os participantes do grupo devem dar a sua opinião sobre as possíveis causas do problema analisado, nenhuma ideia deve ser criticada, todas as ideias devem ser registadas e deve-se evitar a tendência de culpar alguém.

2.2.3 Sipoc

É um mapa de processo de alto nível que auxilia a equipe a sintetizar o processo em uma sequência lógica focada no cliente. O nome SIPOC é um acrônimo com a primeira letra das palavras fornecedor, entradas, processo, saídas e clientes em inglês (suppliers, input, process, output e customer). A ferramenta resumidamente é a própria descrição do seu nome.

- Fornecedor: quem provê a entrada para o processo;
- Entrada: entrada/informação/material necessário para execução da atividade;
- Processo: atividade principal do processo estudado;
- Saída: resultado do processo;
- Cliente: quem são os verdadeiros clientes do processo.

Esta ferramenta gerencial é geralmente utilizada no início de um projeto, para um estudo preliminar do processo e é muitas vezes usado como delimitação do escopo do projeto. É uma ferramenta muito útil para auxiliar o Belt a entender como o processo se conecta.

2.2.4 Diagrama De Ishikawa

Segundo Hagemeyer (2006) o diagrama de Ishikawa trata-se de uma ferramenta esquemática que se assemelha a uma espinha de peixe, onde são listadas as causas e sub-causas de um determinado problema. É uma ferramenta que permite a uma equipe explorar e identificar graficamente todas as potenciais causas relacionadas a um problema a fim de identificar as causas raízes.

2.2.5 Matriz Causa E Efeito

Domenech (2015) afirma que esta é uma ferramenta que leva em consideração a importância dos requisitos estabelecidos pelo cliente, relacionando as entradas chave às saídas chaves.

Ainda segundo Domenech (2015) para elaborar a matriz é preciso: documentar a matriz para referência futura; identificar os requerimentos chave do cliente relacionados com a base do projeto; identificar as etapas e sub-etapas do processo; analisar a correlação de todas as entradas com todas as saídas; obter o produto dos valores de correlação com os valores de prioridade e somar com todas as entradas;

2.2.6 Matriz Esforço e Impacto

A finalidade da Matriz de Esforço x Impacto é filtrar os itens que são factíveis de serem trabalhados na melhoria, eliminando a necessidade de despendere altos níveis de energia em fatores cujos retornos são ínfimos. Destaca-se que as ações alocadas no quadrante de alto esforço e baixo impacto quando realizadas, não trazem resultados relevantes, pois demandam muito tempo para serem executadas e refletem em um impacto não significativo. Deste modo, essas ações devem ser evitadas sempre que possível. Vale ressaltar que é dispendioso e ineficiente investir em melhorias para fatores complexos e dificilmente mutáveis, sendo prioritário investir naqueles que apresentem baixo esforço e alto impacto. (DANTAS et al, 2021).

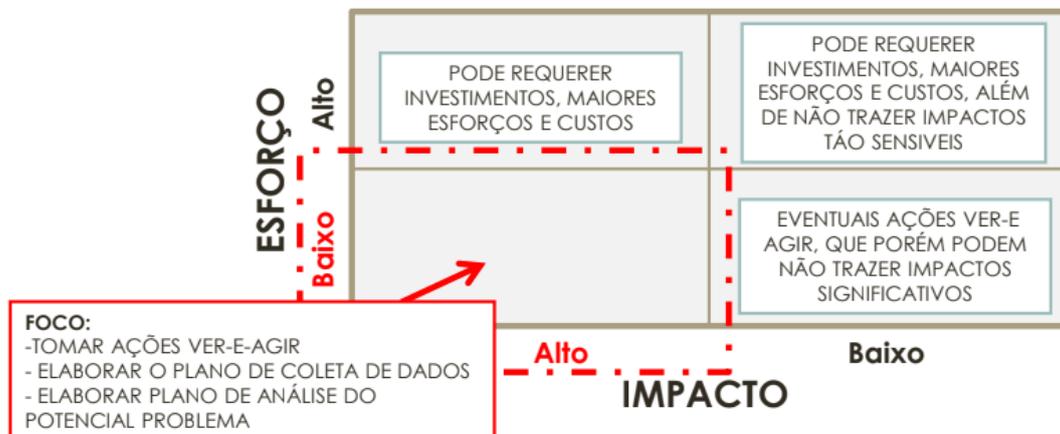


Figura 6: Matriz Esforço x Impacto

Fonte: Lean Six Sigma Pocket Book (2005).

2.2.7 Método 5W2H

O método 5W2H consiste em uma série de perguntas direcionadas ao processo produtivo e permite identificar as rotinas mais importantes, detectando seus problemas e apontando soluções (LISBOA e GODOY, 2012).

É uma ferramenta prática que permite, a qualquer momento, identificar dados e rotinas mais importantes de um projeto ou de uma unidade de produção (SEBRAE, 2008). No contexto LSS é utilizado como um plano de ação.

Tabela 3: Quadro Comparativo entre os métodos 5W2H.

		Método dos 5W2H	
5W	<i>What</i>	O Que?	Que ação será executada?
	<i>Who</i>	Quem?	Quem irá executar/participar da ação?
	<i>Where</i>	Onde?	Onde será executada a ação?
	<i>When</i>	Quando?	Quando a ação será executada?
	<i>Why</i>	Por Quê?	Por que a ação será executada?
2H	<i>How</i>	Como?	Como será executada a ação?
	<i>How much</i>	Quanto custa?	Quanto custa para executa a ação?

Fonte: SEBRAE (2008).

2.3 Concentração Magnética

Materiais magnéticos, que atuam como magnetos e são capazes de atrair minerais de ferro, são conhecidos desde os primórdios da civilização. No entanto, a prática da separação magnética só foi reconhecida no século XIX (SVOBODA e FUJITA, 2003).

A propriedade de um mineral que determina sua resposta a um campo magnético é chamada de susceptibilidade magnética. Com base nessa propriedade, os materiais ou minerais são classificados em duas categorias: aqueles que são atraídos pelo campo magnético e os que são repelidos por ele. No primeiro caso, incluem-se os minerais magnéticos. Dentre estes, tem-se os minerais ferromagnéticos, que são atraídos fortemente pelo campo, e os paramagnéticos, que são atraídos fracamente. No segundo caso, incluem-se aqueles que são repelidos pelo campo, e são denominados diamagnéticos ou não magnéticos (SAMPAIO, 2018).

Com a contínua exaustão das jazidas de alto teor de minérios de ferro, busca-se englobar outros materiais portadores desse metal (antes tidos como materiais estéreis) que possam ser economicamente aproveitados mediante aplicação das diversas técnicas de processamento mineral existentes (REIS, 2015).

A evolução de operações de beneficiamento mineral tem se tornado essencial no aproveitamento de minérios de ferro de baixo teor. Dessa forma, é possível reduzir custos associados a rota de produção e aumentar a eficiência do beneficiamento (CORREA et al, 2019).

O Brasil tem beneficiado itabiritos por diferentes rotas e operações de concentração que envolvem flotação, concentração gravítica e magnética, de acordo com os aspectos físicos, químicos e mineralógicos de cada minério (FERREIRA, 2011; NASCIMENTO, 2010). De acordo com Sampaio e Luz (2004), a concentração magnética, tem se consagrado no beneficiamento de minérios devido aos avanços tecnológicos dos equipamentos e conhecimentos das ocorrências magnéticas.

O campo de aplicação da separação magnética é muito amplo. É usada na concentração de vários minerais ferrosos e não ferrosos, na remoção de impurezas magnéticas contidas nos minerais industriais, na purificação de águas residuais, na remoção e reciclagem de metais contidos em resíduos industriais, etc. (SVOBODA e FUJITA, 2003).

No presente estudo o separador magnético é do tipo carrossel, e dividido em três estágios com três separadores em cada estágio, onde o rejeito de cada estágio alimenta o estágio seguinte, obtendo um concentrado em polpa nos três estágios. A tabela 4 exemplifica os resultados de qualidade nos três estágios da concentração magnética.

Tabela 4: Resultados bi-horários.

Data	Horário	Ident	FE	SiO ₂	Al ₂ O ₃
08/02/2021	05:00	SEP. MAGNETICA ITM CONC 1º POLPA 08/02/2021 03:00 a 05:00	63.33	6.13	.65
08/02/2021	05:00	SEP. MAGNETICA ITM CONC 2º POLPA 08/02/2021 03:00 a 05:00	63.14	7.42	.27
08/02/2021	05:00	SEP. MAGNETICA ITM CONC 3º ESTÁGIO 08/02/2021 03:00 a 05:00	61.09	9.02	.68

Fonte: Acervo do autor.

Na figura 7 são ilustradas as características essenciais do separador magnético a úmido de alta intensidade para circuito contínuo. O equipamento consta de um anel rotativo, às vezes chamado de carrossel, que atravessa um campo magnético no qual são instaladas as matrizes ferromagnéticas. A alimentação é feita de modo que a polpa atravessa uma região com campo de alta intensidade. A fração magnética se adere as matrizes ou, pelo menos, é retardada o suficiente para ser carregada pelo movimento do anel rotativo até uma região de campo com baixa intensidade. Nesta região, as partículas magnéticas remanescentes na matriz são descarregadas com auxílio de um jato d'água e, assim, torna-se possível a coleta da fração magnética em um determinado ponto da calha coletora. Com a remoção da fração magnética encerra-se um ciclo de separação. A separação é obtida com seletividade, visto que facilmente se controlam as variáveis operacionais como: intensidade de campo, elemento de conversão de fluxo, taxa de alimentação, percentagem de sólidos na polpa, velocidade do anel rotativo ou rotor e descarga das partículas magnéticas (adaptado de SAMPAIO, 2018).

Devido à operação com minérios de granulometria cada vez mais fina, as matrizes ferromagnéticas são fabricadas com abertura (gap) também reduzida, para permitir a separação. Atualmente o limite mínimo é de 1,5 mm (RIBEIRO e RIBEIRO, 2015).

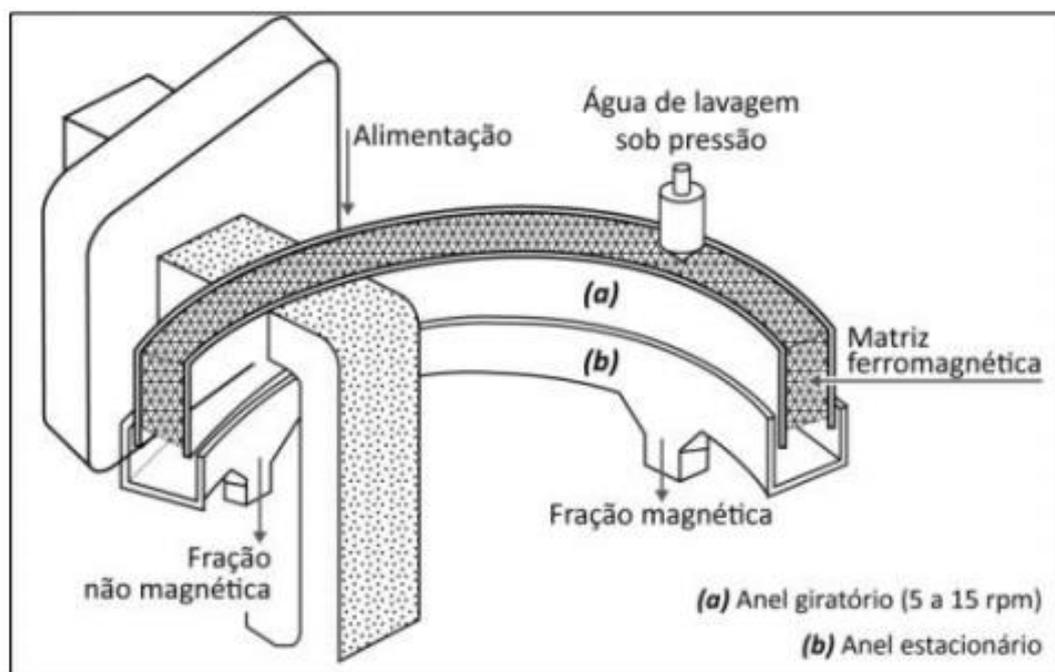


Figura 7: Separador magnético tipo carrossel.

Fonte: Separação magnética e eletrostática. CETEM/MCTIC.

A figura 8 ilustra um concentrador magnético do tipo carrossel da marca INBRAS utilizado na ITM da Ferro+ Mineração S.A.



Figura 8: Concentrador magnético INBRAS.

Fonte: Acervo do autor.

3 METODOLOGIA

O presente estudo acerca da redução da variabilidade do teor de ferro na alimentação do primeiro estágio da separação magnética foi respaldado em um projeto Green Belt – Lean Seis Sigma, que tem como base a utilização da metodologia DMAIC (Define, Measure, Analize, Improve, Control). Neste capítulo serão abordadas as etapas mais relevantes do processo em ordem cronológica dos eventos.

3.1 Define

Identificada a oportunidade de melhoria, deve-se definir de forma analítica o escopo do projeto que visa otimização e padronização de determinada fase do processo produtivo.

Em primeira instância foram levantados dados da percentagem de ferro na alimentação entre dezembro de 2018 a julho de 2019 com auxílio do software ByClientGer®, que permite a consulta de amostras bi horárias lançadas pelo laboratório da mina.

FERRO+		JMN		Período de	18/07/2019	Até	18/07/2019			
Data	Horário	Código	Identificação	FE	SiO2	Al2O3	P	Mn		
18/07/19	23:00 - 01:00	29505	SEP. MAGNETICA ITM ALIM1º ESTÁGIO 17/07/2019 23:00 a 01:00	53.31	18.40	4.29	0.037	0.010		
18/07/19	01:00 - 03:00	29521	SEP. MAGNETICA ITM ALIM1º ESTÁGIO 18/07/2019 01:00 a 03:00	51.24	19.35	5.55	0.066	0.008		
18/07/19	03:00 - 05:00	29546	SEP. MAGNETICA ITM ALIM1º ESTÁGIO 18/07/2019 03:00 a 05:00	47.74	25.69	4.56	0.035	0.005		
18/07/19	05:00 - 07:00	29557	SEP. MAGNETICA ITM ALIM1º ESTÁGIO 18/07/2019 05:00 a 07:00	54.72	16.63	2.33	0.027	0.010		
18/07/19	07:00 - 09:00	29578	SEP. MAGNETICA ITM ALIM1º ESTÁGIO 18/07/2019 07:00 a 09:00	47.94	24.68	3.66	0.032	0.009		
18/07/19	09:00 - 11:00	29586	SEP. MAGNETICA ITM ALIM1º ESTÁGIO 18/07/2019 09:00 a 11:00	54.26	19.22	2.78	0.035	0.016		
18/07/19	11:00 - 13:00	29596	SEP. MAGNETICA ITM ALIM1º ESTÁGIO 18/07/2019 11:00 a 13:00	52.84	18.68	2.91	0.031	0.002		
18/07/19	13:00 - 15:00	29614	SEP. MAGNETICA ITM ALIM1º ESTÁGIO 18/07/2019 13:00 a 15:00	49.56	26.91	2.57	0.014	0.012		
18/07/19	15:00 - 17:00	29632	SEP. MAGNETICA ITM ALIM1º ESTÁGIO 18/07/2019 15:00 a 17:00	49.53	23.71	3.73	0.040	0.014		
18/07/19	17:00 - 19:00	29645	SEP. MAGNETICA ITM ALIM1º ESTÁGIO 18/07/2019 17:00 a 19:00	47.54	27.53	3.87	0.029	0.008		
18/07/19	19:00 - 21:00	29659	SEP. MAGNETICA ITM ALIM1º ESTÁGIO 18/07/2019 19:00 a 21:00	39.66	39.09	2.48	0.014	0.007		
18/07/19	21:00 - 23:00	29679	SEP. MAGNETICA ITM ALIM1º ESTÁGIO 18/07/2019 21:00 a 23:00	50.29	21.00	5.82	0.044	0.010		

Figura 9: Resultados de amostras bi horárias.

Fonte: ByClientGer®.

Posteriormente estes dados foram plotados no Minitab® para serem analisados. Identificou-se a redução da variabilidade do teor de ferro após maio de 2019, o que é justificado pela liberação da nova licença de áreas lavráveis, possibilitando atuar em mais frentes de minério simultaneamente, facilitando assim um blend mais assertivo. Para comprovar essa hipótese, foi feito o teste two variances e comprovou-se estatisticamente a mudança no comportamento do processo. Portanto foi adotado o período entre maio e junho de 2019 como base de dados do projeto para que a liberação da nova licença não interferisse nos resultados das ações do estudo.

A partir da carta controle I-MR Chart mostrada na figura 10, pôde-se observar alteração no comportamento do processo a partir de maio de 2019. Por isso foi realizado o teste de hipótese two variances, mostrado na figura 11, por meio do qual se comprovou tal alteração.

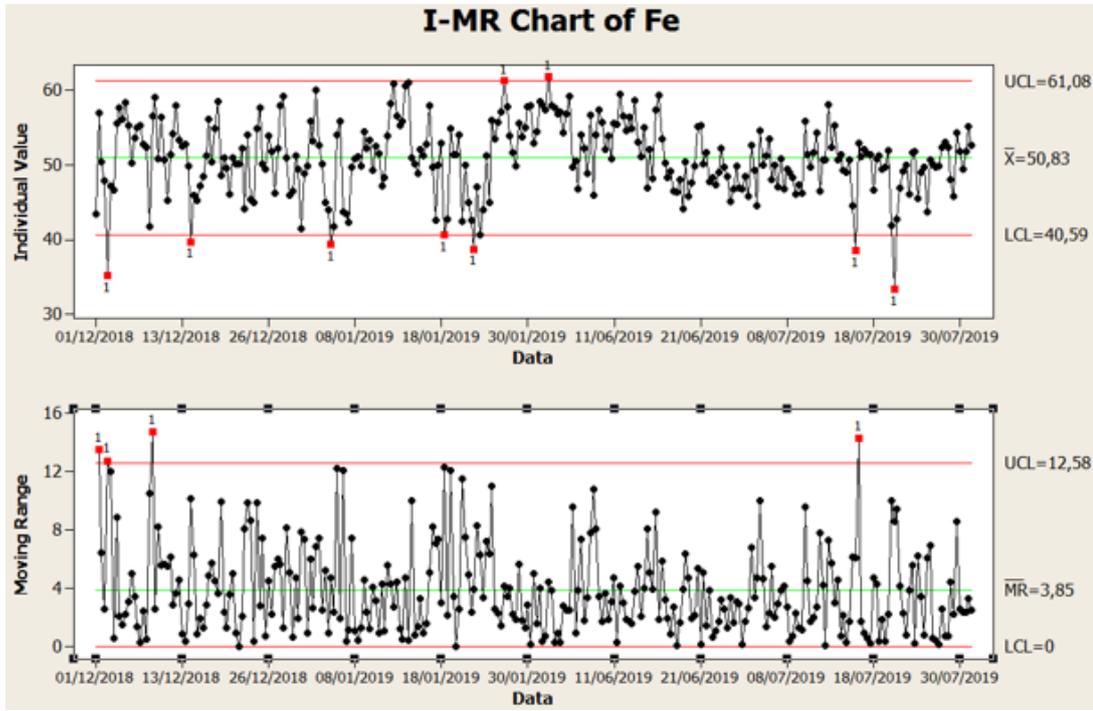


Figura 10: Carta controle I-MR Chart.

Fonte: Minitab®.

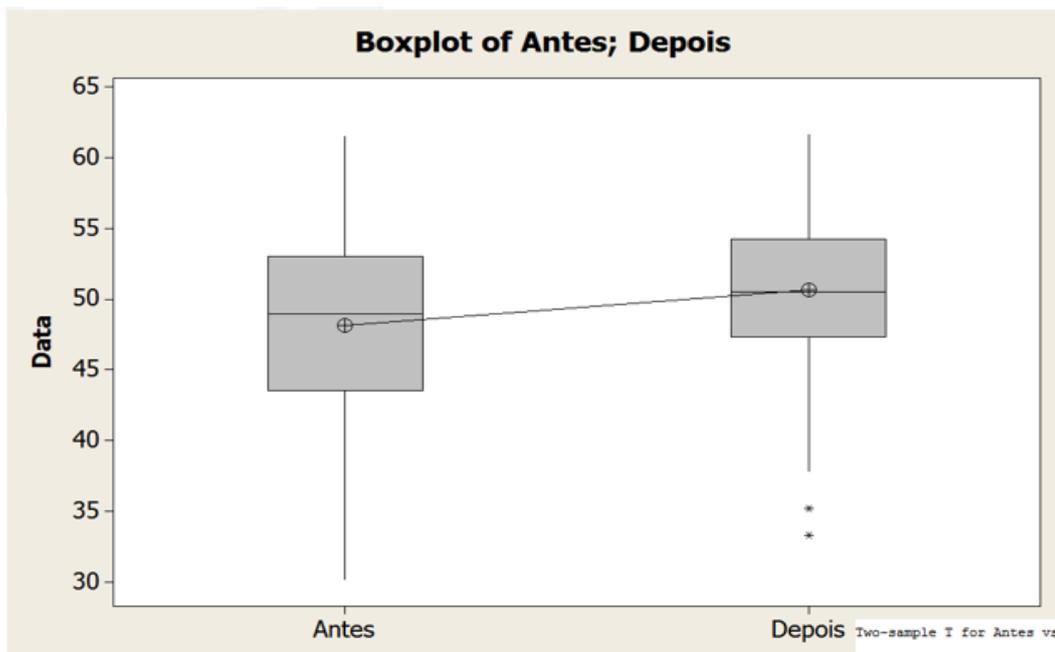


Figura 11: Boxplot resultante do teste two variances.

Fonte: Minitab®.

Após análise, tratamento dos dados e retirada dos “outliers” estabeleceu-se o limite inferior de desvio padrão aceitável para o processo. A meta de desvio padrão do teor de ferro das amostras bi horárias foi estabelecida com auxílio do Minitab® com valor de 1,6 (1º quartil) figura 12.

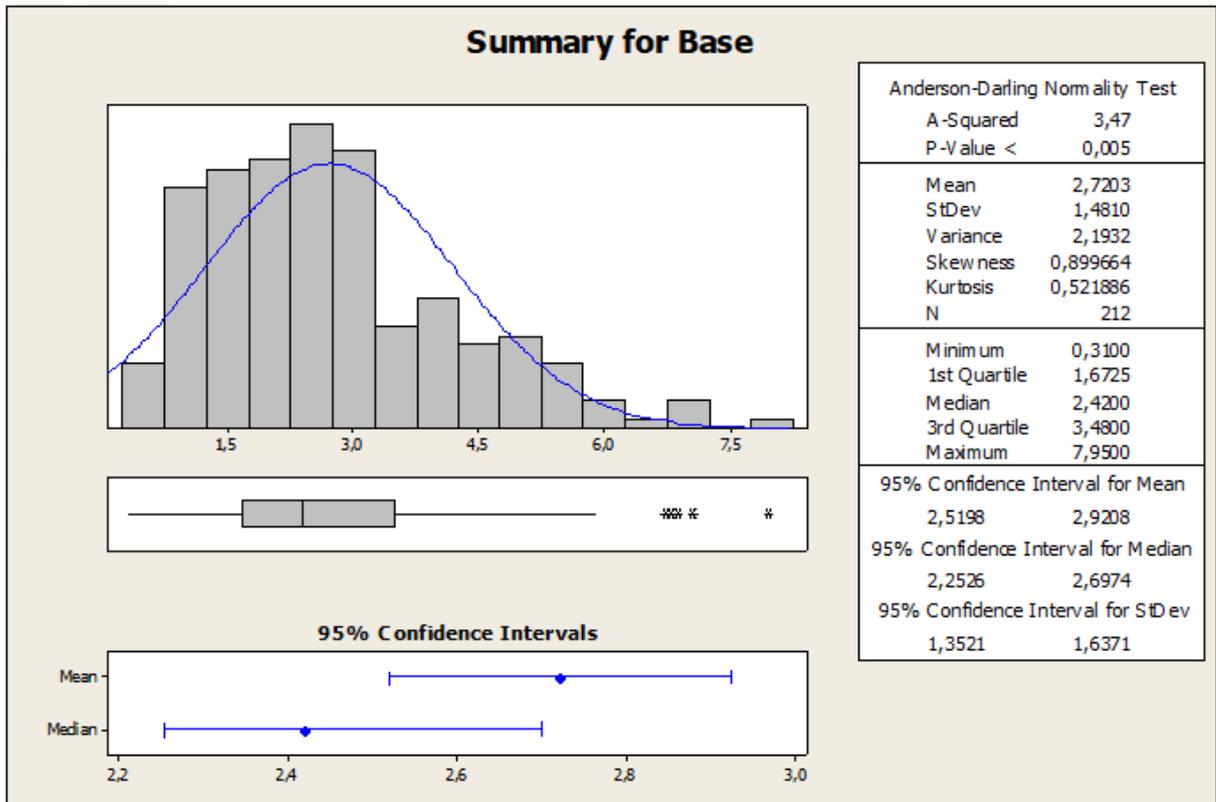


Figura 12: Anderson-Darling normality test.

Fonte: Minitab®.

Além disso comprovou-se a normalidade dos dados evidenciado pelo formato do gráfico, que se aproxima do formato de uma seção transversal de um sino e do A-squared abaixo de 30. Como procedimento inicial, foi calculado o nível sigma do processo, que apresentou um valor de 0,72 (Z. Bench + 1,5), como mostrado na figura 13, em uma escala de 0 a 6, o que demonstra que existiam muitas perdas no processo.

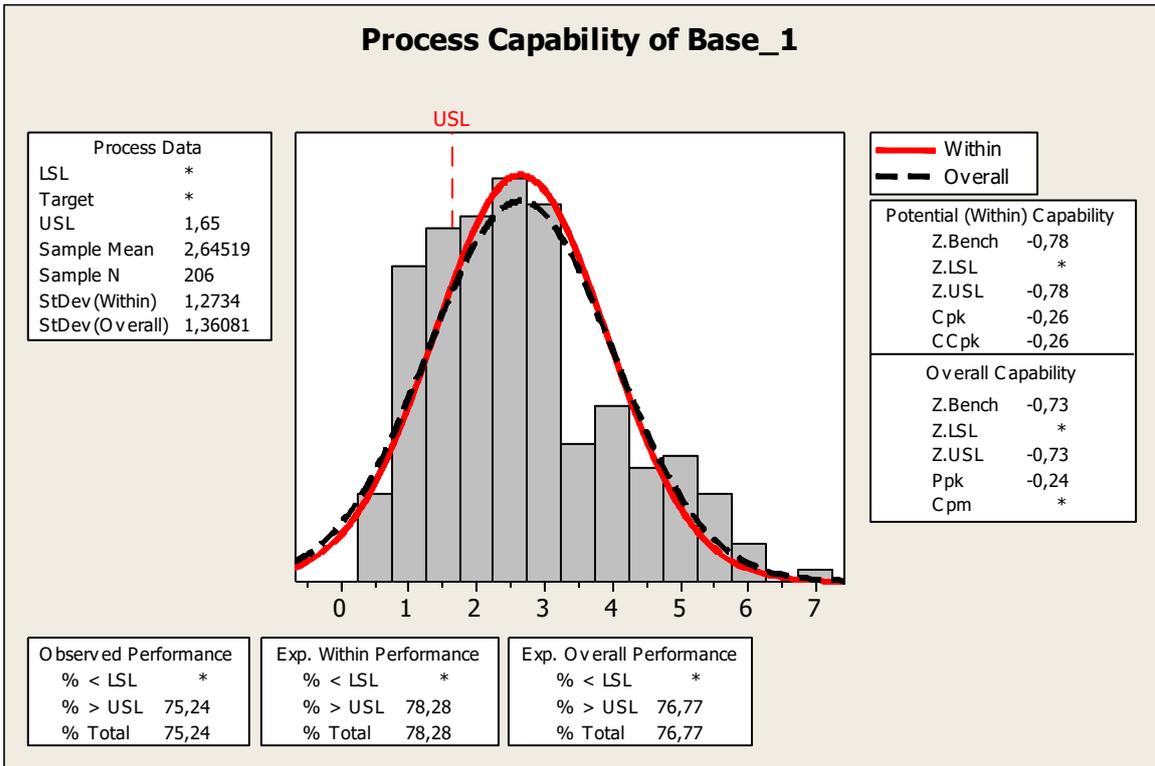


Figura 13: Análise de capacidade.

Fonte: Minitab®.

Também neste momento inicial de definição foi realizado o SIPOC, que é um formulário utilizado de forma macro para auxiliar no mapeamento das atividades em estudo e para identificação dos Suppliers (fornecedores), Inputs (insumos), Process (processo), Outputs (produtos) e Customers (clientes) das atividades. O SIPOC do projeto em questão está ilustrado na figura 14.

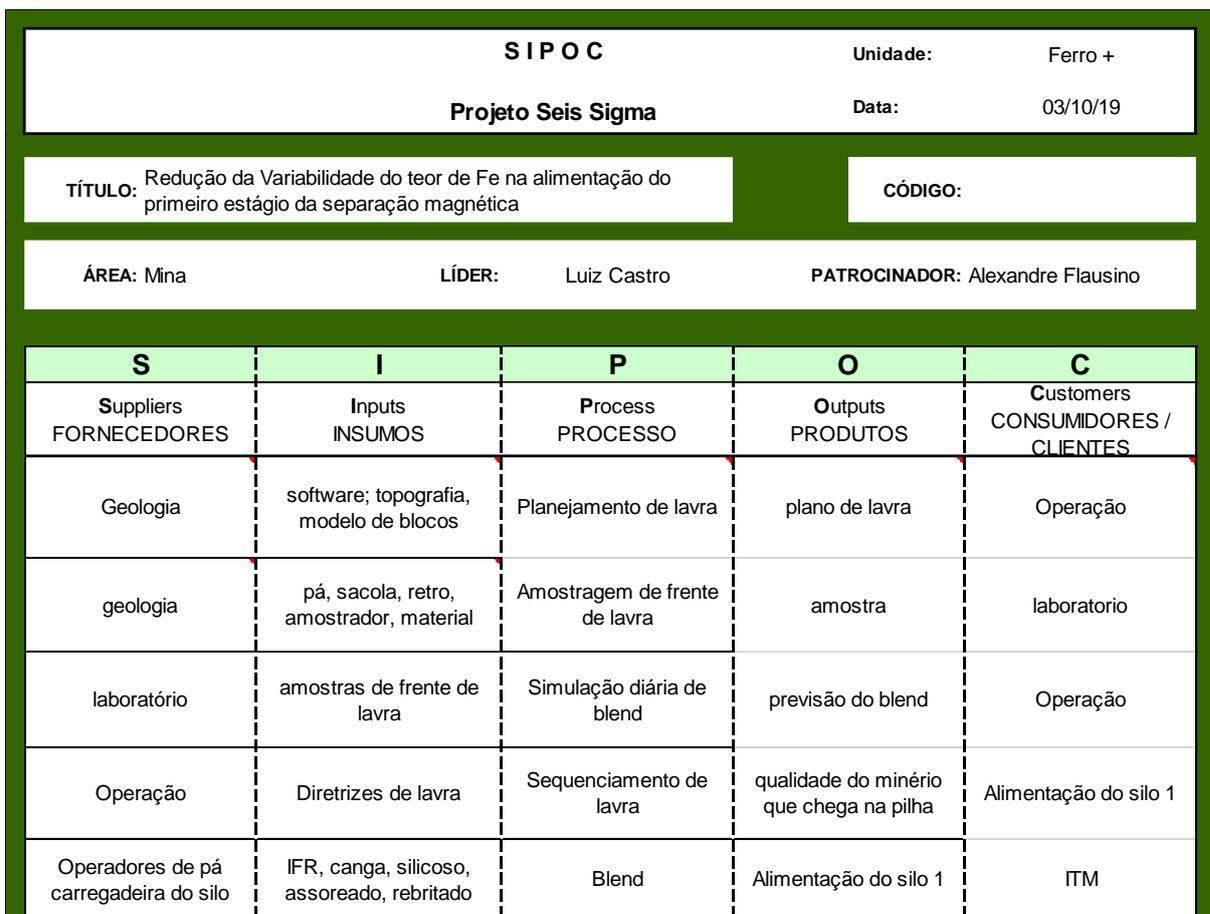


Figura 14: Sipoc.

Fonte: Acervo do autor.

Finalizada a etapa SIPOC, encerra a etapa Define do DMAIC. Nesta etapa foram definidos o desvio padrão do teor de ferro entre resultados bi horários como o principal KPI a ser monitorado, o nível sigma, a meta e as principais entradas e saídas do processo.

3.2 Measure

A próxima etapa (Measure) inicia-se com o diagrama de Ishikawa (espinha de peixe), que tem por finalidade permitir que a equipe explore e identifique graficamente todas as potenciais causas relacionadas a um problema a fim de identificar as causas raízes. Esta ferramenta é frequentemente usada como uma avaliação preliminar do problema, como um brainstorming orientado (LEAN SIX SIGMA POCKET BOOK, 2005). Este diagrama é montado com os Inputs e os Outputs elucidados no SIPOC.

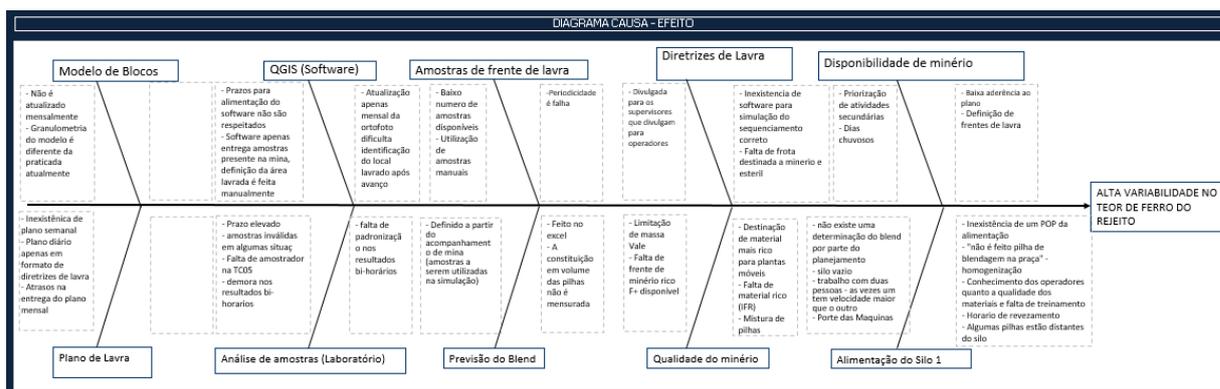


Figura 15: Diagrama de Ishikawa.

Fonte: Acervo do autor.

Levantadas as principais causas de falhas no processo, a etapa seguinte é a Matriz Causa x Efeito. Nesta etapa todos os participantes da equipe votam de 1 – Correlação fraca (pouco relevante) até 5 – Correlação forte (muito relevante) nas causas levantadas no passo anterior (diagrama de Ishikawa) para afunilar e destacar as principais causas que influenciam no processo. Como a equipe foi formada por 08 integrantes, sua nota mínima possível é 8 e a máxima 40 e seus resultados estão apresentados na figura 16.

Nº	Saída(s) do processo (Y): Nome do(s) participante(s) da votação: Possíveis Xs do processo (causas)	PROBLEMA PRIORITÁRIO								TOTAL
		Alta variabilidade no teor de Fe alimentado na Separação Magnética								
		Luiz	Parreira	Reinaldo	Natã	Ely	Thiago	Sidnei	João	
		Pontuações atribuídas a cada Xs								
11	Falta de amostras	5	5	5	5	5	5	5	5	40
2	Demora nos resultados bi-horários	3	5	5	5	5	5	5	5	38
16	Inexistência de planejamento de curtíssimo prazo.	5	3	5	5	5	5	5	5	38
17	Definição de frentes de lavra feita sem análise previa de qualidade	5	3	5	5	5	5	5	5	38
30	Alteração de frente de lavra sem previsão no blend	5	3	5	5	5	5	5	5	38
22	Falta de frente de minério rico Ferro+	5	5	5	5	5	3	5	3	36
28	Operação sem acesso e treinamento ao macromine para acompanhar planejamento	5	3	5	3	5	5	5	5	36
1	Falta de amostrador na TC05	5	5	3	5	5	1	5	5	34
7	Falta de material rico nas pilhas	5	5	5	3	5	5	1	5	34
10	Informação de blend passada de forma extraoficial	5	3	5	3	3	5	5	5	34
25	Padronizar taxa de alimentação	5	3	3	5	3	5	5	5	34
13	Não é realizada ponderação de frentes diferentes para mesma pilha de ROM	1	5	5	5	5	5	3	3	32
21	Limitação de massa Vale	1	3	3	5	5	5	5	5	32
23	Alimentação com pilha pulmão	3	5	3	3	3	5	5	5	32
27	Atraso na entrega dos planos mensais	1	5	5	3	3	5	5	5	32
6	Mistura entre pilhas	5	5	5	3	3	5	1	3	30
14	Inexistencia de software para simulação do sequenciamento correto	1	3	5	5	3	5	3	5	30
24	falta de padronização na amostragem bi horaria	3	3	1	5	3	5	5	5	30
26	Modelo de blocos não condizente com real	5	1	3	5	3	5	5	3	30
9	Porte da máquina	1	3	3	3	5	5	3	5	28
8	Algumas pilhas distantes do silo	3	5	3	5	3	1	1	5	26
3	Inexistência de um POP da alimentação	5	3	1	5	1	3	3	3	24
5	Operadores sem treinamento no horário de revezamento	5	5	3	1	1	5	1	3	24
29	Não existe cobrança a cerca da realização do planejado	1	5	1	5	5	3	3	1	24
12	Não há divulgação direta ao operador	3	5	3	3	3	3	1	1	22
15	Dias chuvosos	1	3	1	3	1	5	5	3	22
19	Priorização de atividades secundárias	5	5	1	1	3	1	3	3	22
20	Falta de frota destinada a estéril e minério	5	5	1	1	3	1	3	3	22
18	Destinação de material mais rico para plantas móveis	3	1	1	3	3	1	5	3	20
4	Trabalho com duas pessoas alimentando silo	3	1	1	1	3	1	1	5	16

LEGENDA: 5 - Correlação Forte 3 - Correlação Moderada 1 - Correlação Fraca

Figura 16: Matriz Causa x Efeito.

Fonte: Acervo do autor.

3.4 Improve

As ações classificadas como baixo esforço e alto impacto são priorizadas dentro de um plano de ação. Baixo esforço e baixo impacto são ações classificadas como ver e agir (kaizen). As ações classificadas como alto esforço e alto impacto são analisadas e, em caso de necessidade, aplicadas. As ações classificadas como alto esforço e baixo impacto são descartadas. A tabela 5 exemplifica um plano de ação 5W2H.

Tabela 5: Plano de ação 5W2H.

PLANO DE AÇÃO			
Falha	Ação	Responsável	Setor
Falta de amostras (X11)	Agendar amostragem semanal com geologia e laboratório	Luiz Otávio / Giulia	Lavra / Geologia / Laboratório
Inexistência de planejamento de curtíssimo prazo. (X16)	Desenvolvimento de acompanhamento diário planejado x realizado	Luiz Otávio	Lavra / Planejamento
Inexistência de planejamento de curtíssimo prazo. (X16)	Elaboração de plano de lavra diário	Luiz Otávio	Lavra / Planejamento
Definição de frentes de lavra feita sem análise previa de qualidade (X17)	Entregar qualidade em relatório para os supervisores	Giulia / Caio	Lavra
Alteração de frente de lavra sem previsão no blend (X30)	Simular blend para diferentes possibilidades de sequenciamento	Giulia / Caio	Lavra
Operação sem acesso e treinamento ao Macromine para acompanhar planejamento (X28)	Capacitação de um membro do setor de lavra nos softwares	Alexandre Flausino	Lavra
Falta de material rico nas pilhas (X7)	Definir planejamento de curtíssimo prazo dimensionando massas a serem lavradas visando atender à demanda da usina	Luiz Otávio	Lavra
Não é realizada ponderação de frentes diferentes para mesma pilha de ROM (X13)	Ponderar qualidade das pilhas de acordo com a massa	Giulia / Caio	Lavra
Alimentação com pilha pulmão (X23) / Mistura entre pilhas (X6)	Elaboração de procedimento padrão da alimentação da usina	Fernando / Moisés	Lavra / ITM

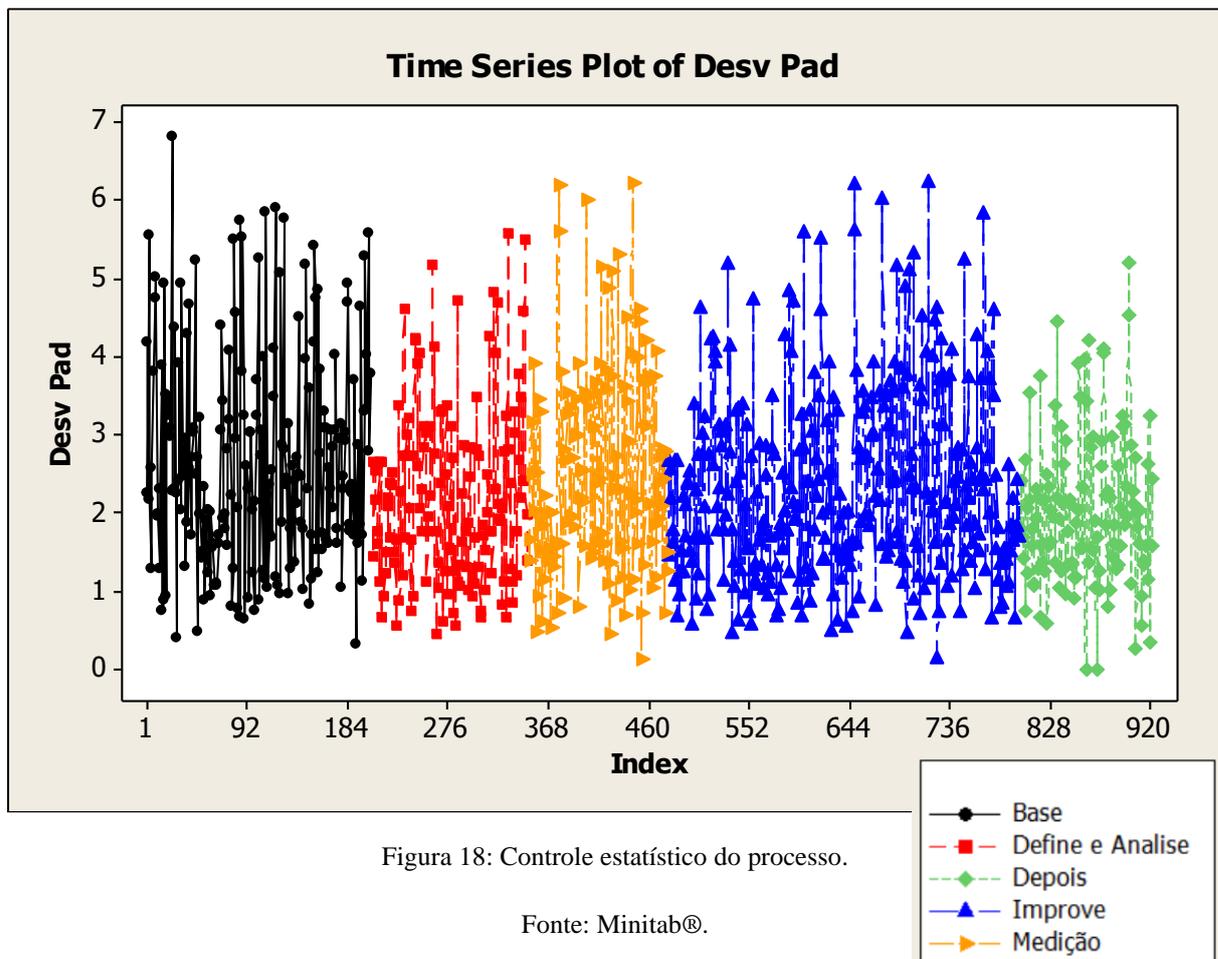
Padronizar taxa de alimentação (X25)	Padronizar taxa de alimentação	Geraldo Parreira / Luiz Otávio / Francisco Patto	Lavra / ITM
Mistura entre pilhas (X6)	Rearranjar pilhas de ROM E SILO 1	Emerson Natã / Geraldo Parreira	Lavra / ITM
Informação de blend passada de forma extraoficial (X10)	Placa de blend para informação direta aos operadores	Luiz Otávio	Lavra
Demora na entrega dos resultados bi horários (X2)	Definição de tempo máximo de entrega de amostrar bi -horárias = 2h	Cassiana	Laboratório
Não cumprimento das diretrizes diárias de lavra	Criar rotina de controle diário de aderência às diretrizes diárias de lavra	Luiz Otávio	Lavra
	Criar relatório de aderência frentes planejadas x realizadas	Luiz Otávio / Rodrigo	Lavra
	Criar e atualizar relatório de formação / consumo das pilhas de ROM	Caio	Lavra
	Montar relatório de origem do material estocado em cada uma das pilhas de ROM	Caio / Rodrigo	Lavra
	Montar relatório de qualidade por turno, observando resultados e desvio padrão	Luiz Otávio	Lavra
	Agendar reunião semanal para discussão das diretrizes	Luiz Otávio	Lavra

Fonte: Acervo do autor.

As evidências de realização das ações listadas serão apresentadas no capítulo resultados e discussões.

3.5 Control

Aplicadas as ações definidas na fase improve deve-se controlar o comportamento do KPI, observando-se as consequências nos resultados do processo. A figura 18 demonstra o comportamento estatístico do processo ao longo de cada fase do projeto.



4 ESTUDO DE CASO

4.1 Descrição do Empreendimento

A Ferro+ Mineração faz parte do grupo J.Mendes, que possui diversos empreendimentos em segmentos diversos, entre eles destaca-se o setor minerário. A mina está em operação desde 2007 e está localizada nos municípios mineiros de Congonhas e Ouro Preto, as margens da rodovia BR-040, km 595, a 68 km de Belo Horizonte (figura 19). Com cerca de 530 colaboradores tem foco na extração, beneficiamento e comercialização de minério de ferro. A mina tem capacidade produtiva atual de 5 milhões de toneladas/ano, com alto padrão de qualidade. É reconhecida pela excelência de seus processos e pela busca constante do máximo desempenho. O minério de ferro da mina tem comprovada diferenciação, evidenciada pelo fato de toda produção ser vendida para renomadas empresas.



Figura 19: Localização da mina Ouro Preto - Ferro+ Mineração S.A.

Fonte: Adaptado de < <http://www.jmendes.com.br/ferro-mineracao>>. Acesso em abr. 2021.

4.2 Caracterização dos Principais Litotipos da Ferro+ Mineração S.A.

A mina da Ferro+ Mineração S.A. encontra-se na porção sudoeste do Quadrilátero Ferrífero (QF). Do ponto de vista geológico, a jazida está situada em um setor de grande complexidade estrutural do QF, com influência do Sinclinal Dom Bosco, de orientação geral E-W, e do Sinclinal Moeda, cujo traço axial é aproximadamente N-S (TRZASKOS et al. 2011).

Dentre os litotipos presentes na mina, podem-se destacar:

Itabirito Friável Rico (IFR): Rocha de coloração cinza escuro-azulado, friável, apresenta enriquecimento supergênico, bandamento as vezes preservado, pode apresentar foliação, composta principalmente por óxido de ferro (hematita) e quartzo. São classificados IFR, itabiritos friáveis com mais de 55% de ferro na rocha. Geralmente apresenta contato gradual com IF e IFP, e brusco com Filito.

Itabirito Friável (IF): Rocha de coloração cinza, friável, apresenta enriquecimento supergênico, bandamento geralmente preservado, pode apresentar foliação, composta

principalmente por óxido de ferro (hematita) e quartzo, com bandas de quartzo mais presente do que no IFR. São classificados IF, itabiritos friáveis com porcentagem de ferro entre 55% e 45% na rocha. Geralmente apresenta contato gradual com IFR e IFP, e brusco com Filito.

Itabirito Friável Pobre (IFP): Rocha de coloração cinza claro, friável, apresenta enriquecimento supergênico, bandamento geralmente preservado, pode apresentar foliação, composta principalmente por óxido de ferro (hematita) e quartzo, com bandas de quartzo mais frequentes do que no IF. São classificados IFP, itabiritos friáveis com porcentagem de ferro menor que 45% na rocha. Geralmente apresenta contato gradual com IFR e IF, e brusco com filito.

Itabirito Semi-compacto Rico (ISCR): Rocha de coloração cinza escuro-azulado, semi-compacta, apresenta enriquecimento supergênico, bandamento as vezes preservado, pode apresentar foliação, composta principalmente por óxido de ferro (hematita) e quartzo. São classificados ISCR, itabiritos semi-compactos com mais de 55% de ferro na rocha.

Itabirito Semi-compacto (ISC): Rocha de coloração cinza, semi-compacta, apresenta enriquecimento supergênico, bandamento geralmente preservado, pode apresentar foliação, composta principalmente por óxido de ferro (hematita) e quartzo. São classificados ISC, itabiritos semi-compactos com porcentagem de ferro menor que 45% na rocha.

Itabirito Semi-compacto Pobre (ISCP): Rocha de coloração cinza, semi-compacta, apresenta enriquecimento supergênico, bandamento geralmente preservado, pode apresentar foliação, composta principalmente por óxido de ferro (hematita) e quartzo. São classificados ISCP, itabiritos semi-compactos com porcentagem de ferro menor que 45% na rocha.

Itabirito Compacto (IC): Rocha de coloração cinza, compacta, apresenta enriquecimento supergênico, bandamento preservado, pode apresentar foliação, composta principalmente por óxido de ferro (hematita) e quartzo. São classificados IC, itabiritos compactos independentes da porcentagem de ferro na rocha.

Canga (CG): Cobertura de coloração avermelhada, estruturada, muito densa, geralmente compacta, composta principalmente por goethita, pode ocorrer poções mais argilosas e outros minerais como hematita e quartzo. Pode apresenta contato brusco ou gradual para IFR.

Laterita (LT): Cobertura de coloração avermelhada, pouco densa, muito argilosa, friável, composta principalmente por goehtita e argila, pode estar em in situ ou não. Pode apresenta contato brusco ou gradual para as demais litologias.

Filito (FL): Rocha de coloração esbranquiçada-amarelada, quando alterada, cinza-prateada, quando são, friável, de granulação muito fina, aspecto sedoso, foliação bem marcada, composto por principalmente sericita e pouco quartzo. Aparece como a principal litologia encaixante dos itabiritos (hang wall and footwall), e também ocorre com lascas dentro dos mesmos.

Quartzo Sericita Xisto (QSX): Rocha de coloração amarelada, alterada, apresenta xistosidade, friável, composto principalmente por sericita e quartzo, podendo variar porcentagem de quartzo na rocha passando para um quartzo sericita xisto (SQX).

Rocha Intrusiva Básica (RIB): Rocha de coloração amarelada, quando alterada, e esverdeada, quando são, geralmente friável, granulação média, equigranular a porfirítica, com pórfiros de plagioclásio, composta por plagioclásio, anfibólio, biotita e pouco quartzo. A colocação desses corpos ocorre em zonas como certa predisposição (Zonas de falha).

Quartzito (QT/QMB): Rocha de coloração esbranquiçada a acinzentada, friável a compacta, pode apresentar foliação e acamamento preservado, composto por mais de 75% de quartzo, com presença de outros minerais como óxidos de ferro e sericita.

4.3 Características Gerais da Operação

A mina da Ferro+ Mineração S.A. pode ser subdividida atualmente em três cavas. Cava central (1), cava sul (2) e cava norte (3), como é possível perceber na figura 20 abaixo.

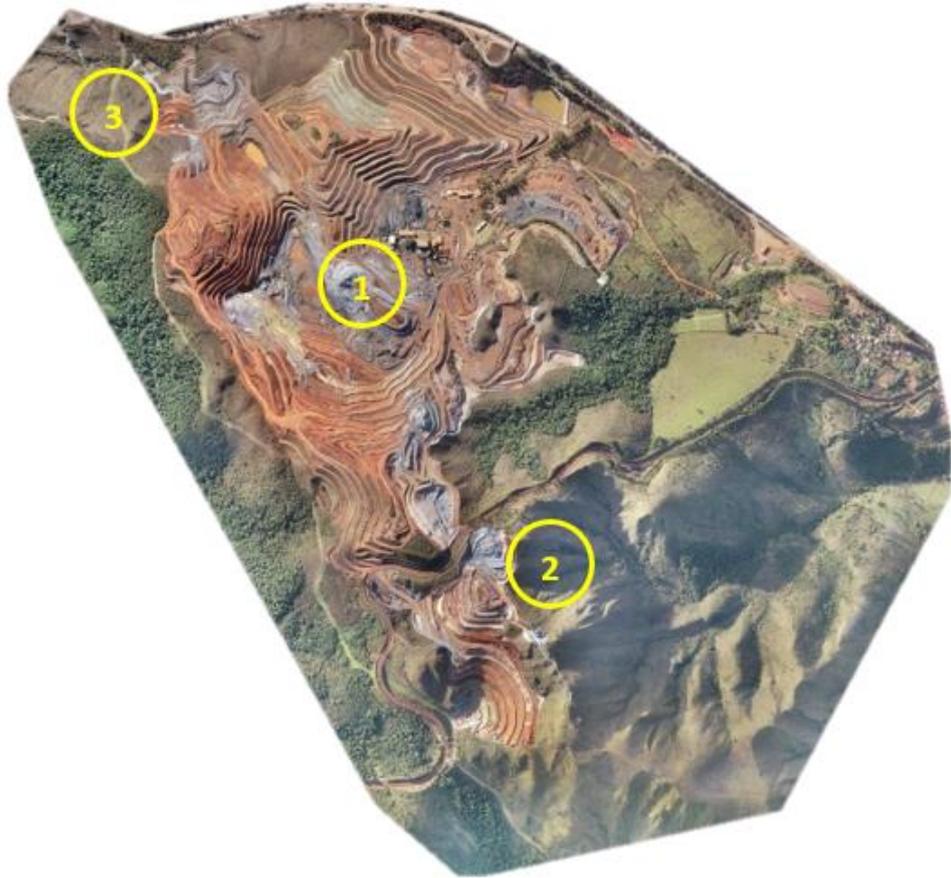


Figura 20: Ortofoto da mina.

Fonte: Acervo da Ferro+ Mineração S.A.

Tanto para minério quanto para estéril o material é quase em sua totalidade friável, sendo sua lavra feita por escavadeiras hidráulicas, não havendo necessidade de operação de perfuração e desmonte, apenas para regularização de eventuais blocos que possam vir dificultar a operação na frente de lavra. Para materiais compactos como a canga (CG) e o itabirito compacto (IC) o desmonte é feito via rompedor.

A lavra do minério é feita, em sua grande maioria, em duas ou três frentes, de onde já é conhecido previamente o Split (teor por faixas granulométricas) por meio de campanhas de amostragens semanais. Sendo assim o ROM pode servir para a alimentação das plantas móveis ou para a usina de beneficiamento. O ROM destinado a usina é disposto em quatro pilhas de acordo com seu teor, são elas:

- Pilha 1: minério rico;
- Pilha 2: minério intermediário ou canga;
- Pilha 3: minério intermediário e/ou silicoso;
- Pilha 4: Assoreado.

A blendagem das pilhas pode ser feita diretamente no britador ou no meio da praça de alimentação, conforme a necessidade da usina. Na Instalação de tratamento de minério (ITM), o material é fragmentado no britador primário e classificado em 03 peneiras de produtos: lump ore, hematitinha e sinter feed (em ordem decrescente de classificação). O passante destas peneiras alimenta a concentração magnética que é responsável pela produção do Pellet Feed.

Tabela 6: Especificação de produtos.

LUMP ORE	Fe	SiO2	Al2O3	P	MN	H2O	
LSE		9,00	5,50	0,10	0,10	6,50	44 mm
Meta	59,00	7,00	4,00	0,05	0,05	5,50	
LIE	57,00						31 mm

HEMATITINHA	Fe	SiO2	Al2O3	P	MN	H2O	
LSE		9,00	5,50	0,10	0,10	6,50	31 mm
Meta	59,00	7,00	4,00	0,05	0,05	5,50	
LIE	57,00						12.7 mm

SINTER FEED	Fe	SiO2	Al2O3	P	MN	H2O	
LSE		4,50	4,50	0,10	0,20	8,00	12.7 mm
Meta	61,50	3,50	3,50	0,08	0,10	6,50	
LIE	60,50						1 mm

PELLET FEED	Fe	SiO2	Al2O3	P	MN	H2O	
LSE		4,00	1,50	0,04	0,20	11,00	1 mm
Meta	66,00	3,50	1,20	0,02	0,02	10,50	
LIE	65,20						

Fonte: acervo da Ferro+ Mineração S.A.

Os materiais com granulometria acima do Pellet Feed são dispostos em silos, de onde são transportados por caminhões para o pátio de vendas. As pilhas formadas no pátio são divididas por produtos, qualidade e granulometria, sendo destinados aos clientes através de vias rodoviárias, o transporte é feito parte por terceiros e parte por frota própria.

O rejeito gerado no beneficiamento é filtrado em filtro prensa e empilhado à seco. Quando há mais geração de rejeito que a capacidade da filtragem, este é bombeado em polpa para baias de secagem.

Por se tratar de uma mina de média dimensão seus equipamentos foram dimensionados com porte equivalente. A frota é composta principalmente por escavadeiras hidráulicas, pás carregadeiras sobre rodas, caminhões fora de estrada, articulados e rodoviários. As tabelas abaixo (tabela 7 e tabela 8) demonstram a frota atualizada por número de equipamentos.

Tabela 7: Equipamentos de transporte e carga.

EQUIPAMENTOS DE TRANSPORTE E CARGA					
Caminhões		Escavadeiras		Carregadeiras	
Mercedes Actros 8x4	3	Caterpillar 320D2	2	Caterpillar 980	1
SANY SKT90S	9	SANY SY750H	2	Caterpillar 972L	15
SCANIA G480	23	Volvo EC480D	10	Volvo L250G	1
Volvo A40F	3				
Volvo A45	1				
Volvo A60H	3				

Fonte: Acervo do autor.

Tabela 8: Equipamentos auxiliares.

EQUIPAMENTOS AUXILIARES							
Trator		Motoniveladora		Rolo Compactador		Pipa	
Caterpillar D6T	3	Caterpillar 140M	1	Dinapac 250	2	Mercedes Axor	3
Caterpillar D8	2	John Deere 670G	1				
John Deere 850J	1						

Fonte: Acervo do autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Priorizadas as ações que iriam gerar maior impacto e que não necessitariam de altos investimentos, partiu-se para execução destas soluções. Dentre as ações tomadas têm-se algumas evidências de parte dessas soluções nas figuras abaixo.

Um dos problemas mapeados era a falta de amostras de frente de lavra, para sanar este problema foi estipulado campanhas de amostragens semanais na mina. A figura 21 ilustra o aumento considerável da nuvem de pontos amostrados.



Figura 21: Melhoria nas amostragens.

Fonte: Acervo da Ferro+ Mineração S.A.

Com essa ação foi possível robustecer o banco de dados de amostras da geologia, aumentando o conhecimento do minério e facilitando a melhor definição de frente de lavra.

Para evitar erros de instrumentação, foi vinculado às campanhas de amostragens a equipe de topografia, com equipamentos mais precisos, minimizando os erros de localização das amostras, como é possível perceber na figura 22.



Figura 22: Melhoria na coleta de dados espaciais das amostras.

Fonte: Acervo do autor.

Além das ações supracitadas acerca de campanhas de amostragens, foram executadas algumas melhorias na praça de ROM. Com objetivo de reduzir a DMT das carregadeiras responsáveis pela alimentação do silo 01, melhorar a sinalização do local e a identificação das pilhas de minério. Foi feito o enchimento das pilhas com laterita, marcação nas partes superiores e inferiores com tambores, leiras de divisão, pontaletes e placas para melhor identificação das pilhas (figura 23). Também foi confeccionada uma placa com adesivos imantados de identificação do blend atual que pode ser atualizada no começo de cada turno, conforme as características do minério liberado (figura 24).



Figura 23: Redução da distância das pilhas ao silo 01.

Fonte: Acervo do autor.



Figura 24: Identificação do blend.

Fonte: Acervo do autor.

Foi adotado o software Avenza® nos relatórios de diretrizes de lavra para aumentar a assertividade na proposição do blend. Com auxílio deste software é possível visualizar em tempo real qual a amostra mais influente da frente de lavra em questão.



Figura 25: Software Avenza®.

Fonte: Acervo do autor.

Além disso, foi revisado o POP das carregadeiras dedicadas à alimentação do silo 01 e implementou-se relatórios de comparação projetado x realizado para acompanhar os teores da alimentação diária (figura 26) e bi horária (figura 27).

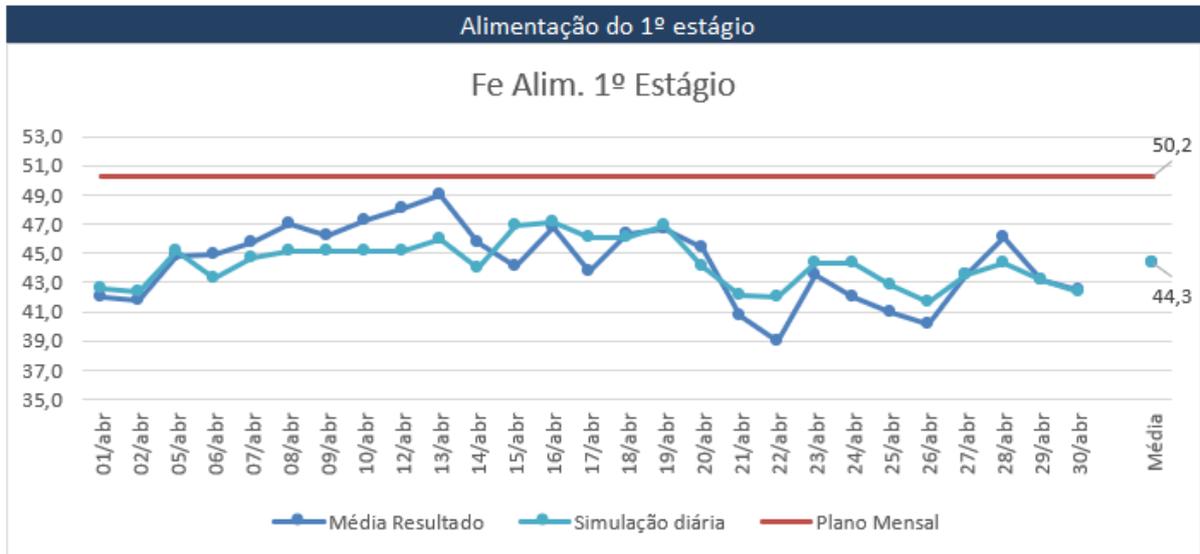


Figura 26: Relatório de comparação de teor de Fe.

Fonte: Acervo da Ferro+ Mineração S.A.

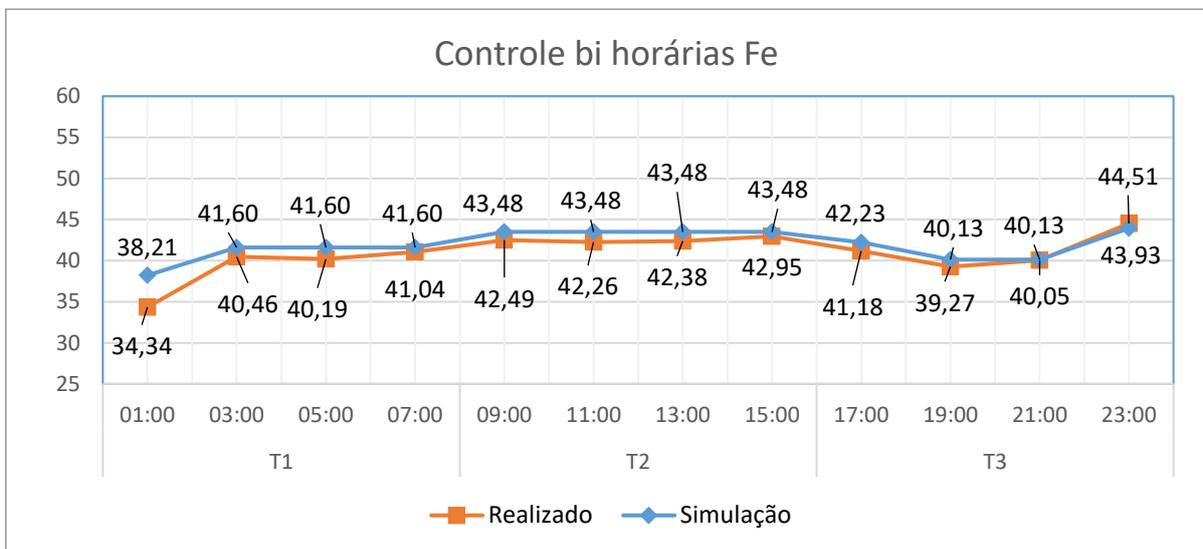


Figura 27: Relatório de comparação de teor de Fe bi horária.

Fonte: Acervo da Ferro+ Mineração S.A.

6 CONCLUSÃO

A aplicação da metodologia LSS possibilita melhor visualização de problemas existentes dentro de qualquer tipo de processo. Um processo produtivo de mineração não é diferente, portanto, a aplicação das ferramentas citadas facilita a definição do problema, a medição e análise de resultados e a consequente implementação de projetos de melhoria contínua.

No caso estudado no presente trabalho a aplicação desta metodologia tornou mais objetiva os procedimentos para a redução da variabilidade do teor de ferro alimentado no primeiro estágio da concentração magnética.

A figura 28 apresenta a comparação estatística desta variabilidade antes e depois da execução do projeto e a figura 29, o boxplot proveniente de teste de hipótese two sample t.

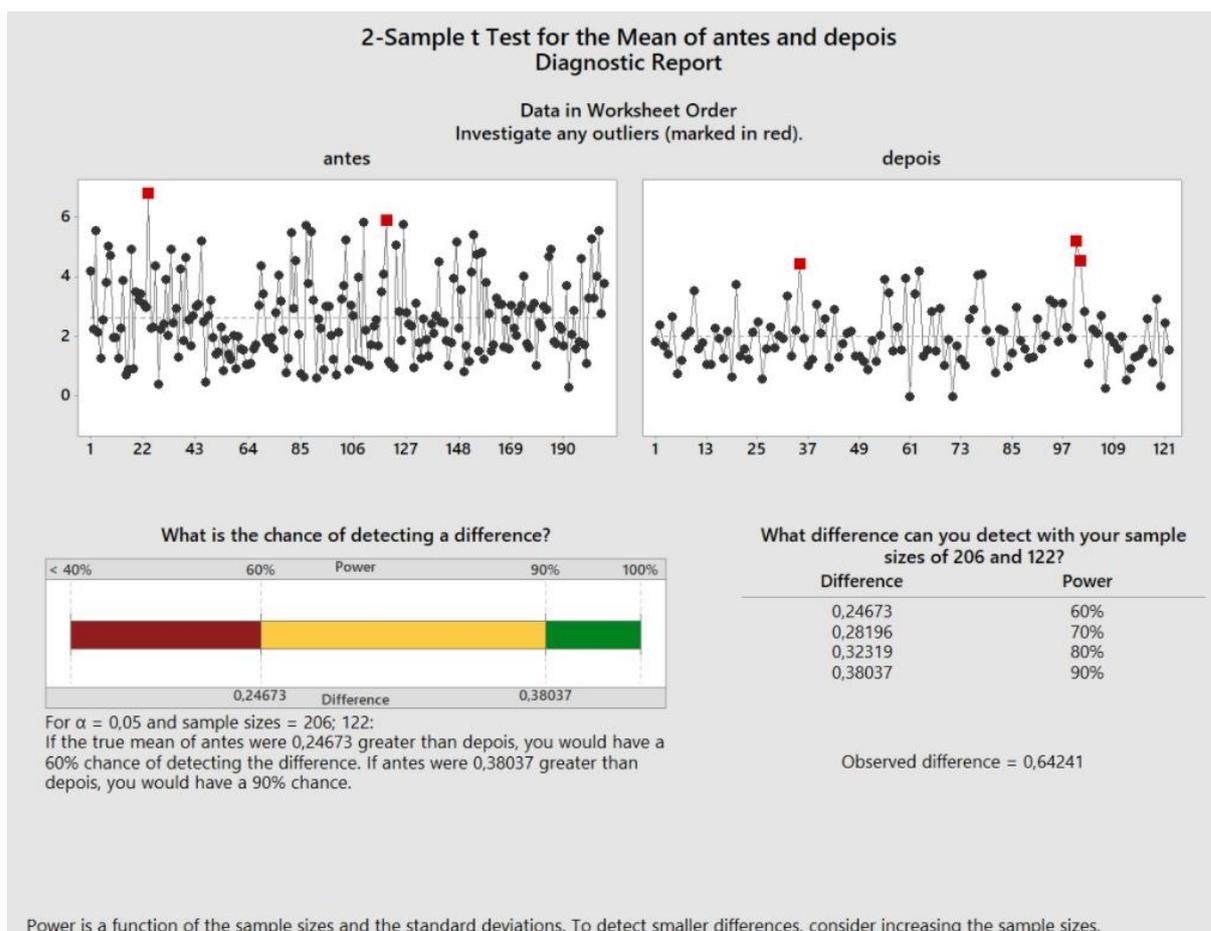


Figura 28: Teste de hipótese two sample t.

Fonte: Minitab®.

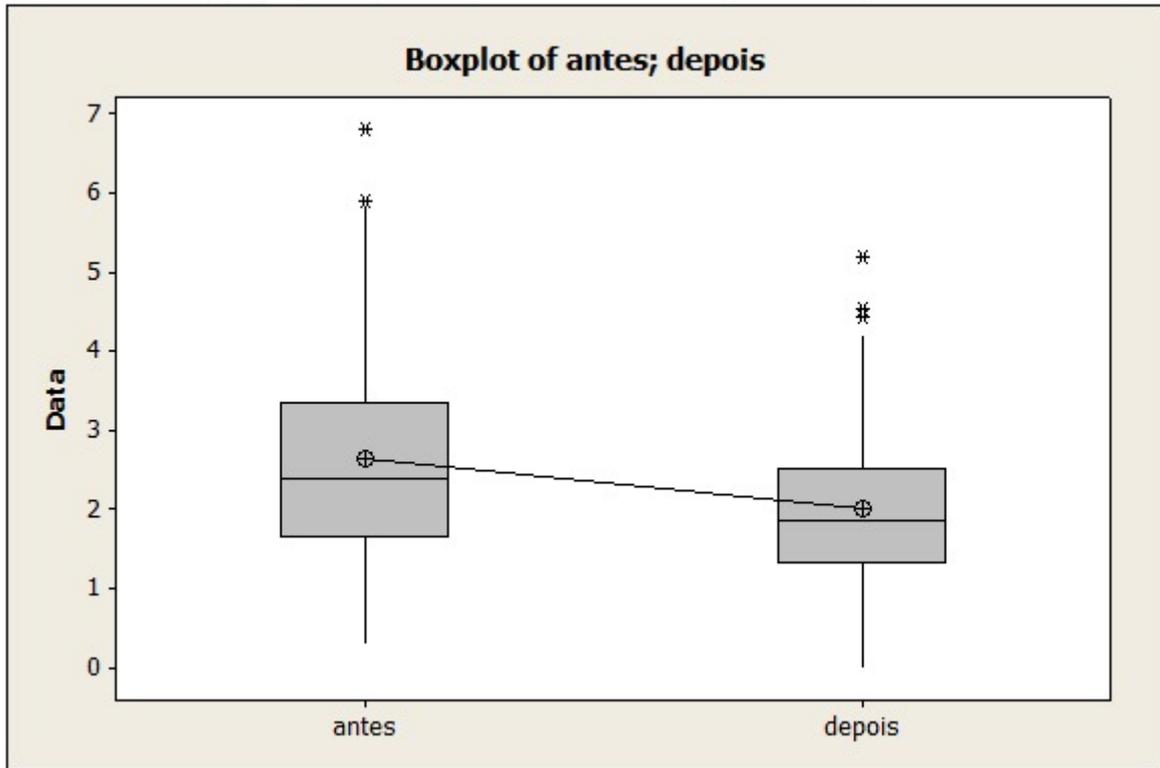


Figura 29: Boxplot proveniente do teste de hipótese two sample t.

Fonte: Minitab®.

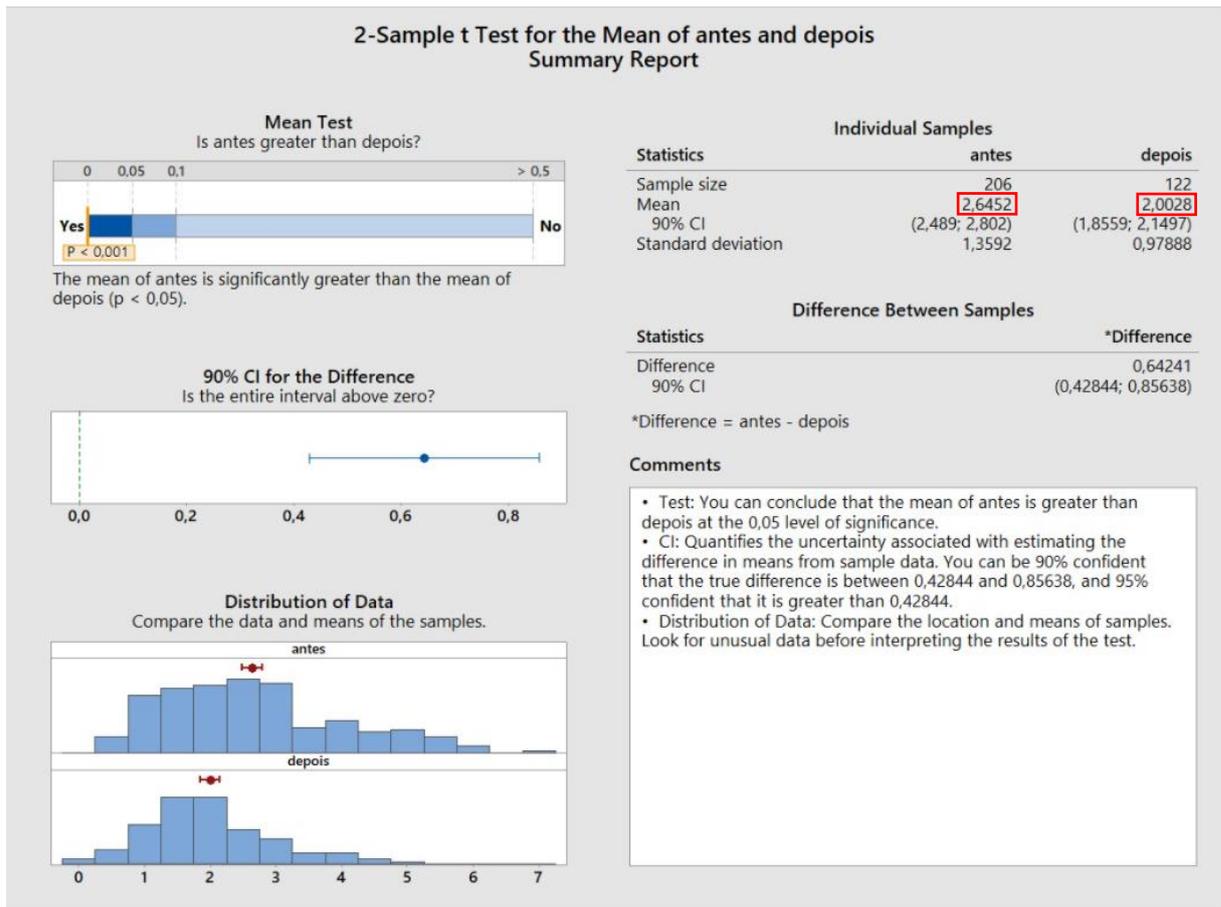


Figura 30: Comparativo de desvio padrão.

Fonte: Minitab®.

Com base no compilado de informações apresentadas na figura 30, pode-se observar que obtemos p-value menor que 0,05 e a redução do desvio padrão de 2,6452 para 2,0028 o que comprova a mudança estatística no processo em termos de média, e a redução de aproximadamente 24% da variabilidade do teor de ferro alimentado no primeiro estágio da concentração magnética respectivamente.

Essa redução, comprovada estatisticamente, resulta em diversos ganhos estratégicos dentro do processo produtivo da organização. Dentre estes ganhos ressalta-se: o melhor aproveitamento da reserva mineral lavrável, maior recuperação mássica e metalúrgica e melhor previsibilidade do processo de concentração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F. F. M. 1977. O Craton de São Francisco. *Rev. Bras. Geociências*, 7 (4): 349 – 364.

BALTAZAR, O. F., Zucchetti, M., 2005. Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: A review of the setting of gold deposits. *Ore Geology Reviews*, no prelo.

BRITO, Elisa Araujo de Salvo. A melhoria contínua como espaço de criação de soluções: a implementação do Lean Seis Sigma em uma empresa de mineração. 2018. 124 f. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2018.

CARVALHO, P. S. L. Silva MM, Rocio MAR, Moszkowicz J. Minério de Ferro. 2014. *BNDES Setorial*, 39, 197-234.

CARVALHO, P. S. L., et al. Minério de ferro. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, n. 39, p. 197-233, mar. 2014.

CORREA, A. S.; SOUZA, T. F.; SANTOS, L. H. Estudo dos parâmetros para concentração magnética do minério de ferro de uma mina do quadrilátero ferrífero. XXVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa Belo Horizonte-MG, 4 a 8 de novembro de 2019.

COUTINHO, Heitor Lobo. Melhoria contínua aplicada para carregamento e transporte na operação de mina a céu aberto. 2017. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

DANTAS, Ana Carolina Cardoso et al. Aplicabilidade da metodologia seis sigma para a diminuição da ocorrência de infecções vulvovaginais. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 1, p. 7523-7538, 2021.

DIAS, S. M. Implementação da metodologia Lean Seis-Sigma – O caso do Serviço de Oftalmologia dos Hospitais da Universidade de Coimbra. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. 2011.

DOMENECH, C. Estratégia Lean Seis Sigma. 1ª Edição. São Paulo: M. I. Domenech, 2015.

DORR, J. V. N. 2nd. 1969. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *U. S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, 641-A: 110p.

FERREIRA, D. H. O. Principais Etapas do Tratamento de Minérios Itabiríticos do Quadrilátero Ferrífero. (Monografia de Pós-Graduação). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Minerais, Belo Horizonte; 2011.

FRANCO, P. Modelo estrutural de previsão de preço e volume negociado de minério de ferro. Rio de Janeiro: Fundação Getulio Vargas. 2008.

GELDERMAN, C. e WEELE, A. V. Purchasing Portfolio Models: A Critique and Update. *Journal of Supply Chain Management* 4. P 19-28. 2011.

GEORGE, M. L. Lean Seis Sigma para serviços: como utilizar velocidade Lean e qualidade Seis Sigma para melhorar serviços e transações. Tradução de Carlos Henrique Trieschmiann. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2004.

GEORGE, M.; Rowlands, D.; Price, M.; MAXEY, J. Lean Six Sigma Pocket Book. 2005.

HAGEMEYER, C., Gershenson, J., e Johnson, D., 2006. Classification and application of problem solving quality tools: A manufacturing case study. *The TQM Magazine*, 18 (5) pp. 455-483.

IBRAM, Instituto Brasileiro de Mineração. Disponível em <http://www.ibram.org.br>. Acessado em 14/05/2021.

LISBÔA, M. G. P. e GODOY, L. P. Aplicação do método 5W2H no processo produtivo. *Iberoamerican Journal of Industrial Engineering*, Florianópolis, v.4, n.7, p. 32-47, 2012.

MACHADO, Maria Marcia Magela. Construindo a imagem geológica do Quadrilátero Ferrífero: conceitos e representações. 2009.

MACHADO, N., Noce, C. M., Ladeira, E. A. & Belo de Oliveira, O. A. 1992. U-Pb Geochronology of Archean magmatism and Proterozoic metamorphism in the Quadrilátero Ferrífero, southern São Francisco Craton, Brazil. *Geological Society of America Bulletin*, 104: 1221-1227.

MAIA, E. S. Pelotização e Redução de Concentrado Magnético. [Dissertação de Mestrado]. Programa de PósGraduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos da PUC-Rio, Rio de Janeiro; 2011.

NASCIMENTO, D. R. Flotação Aniônica de Minério de Ferro. (Dissertação de Mestrado). Escola de Minas de Ouro Preto. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto; 2010.

NT Desenvolvimento Gerencial. Introdução Lean Seis Sigma Champion. Apostila do treinamento.

PYZDEK, Thomas; KELLER, Paul. *The Six Sigma Handbook: a complete guide for green belts, Black belts, and managers at all levels*. McGraw-Hill Companies, 2010.

QUARESMA, F. L. (2009). Desenvolvimento de estudos para elaboração do plano duodecenal (2010-2013) de Geologia, mineração e transformação mineral, MME. Brasília – DF.

REIS, J. L. M. et al. Concentração magnética de materiais goethíticos do Quadrilátero Ferrífero. *Anais do ENTMME–Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa*, 2015.

RIBEIRO, J.P.; RIBEIRO, C.H.T. The noBLOCK technology - a major breakthrough in wet high intensity magnetic separation (WHIMS). *REM - Revista da Escola de Minas*, 68(3), p. 361-366, 2015.

RODRIGUES, Jéssica Dias. Proposta de melhoria da produtividade da escavadeira Liebherr R 954 SME através da metodologia Lean Seis Sigma. 2018. 65 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

ROESER, Hubert Mathias Peter; ROESER, Patricia Angelika. O Quadrilátero Ferrífero-MG, Brasil: aspectos sobre sua história, seus recursos minerais e problemas ambientais relacionados. 2010.

SAMPAIO, J. A., Luz, A. B. D., FRANÇA, S. C. A., & GONZAGA, L. M. (2018). Separação magnética e eletrostática. CETEM/MCTIC.

SAMPAIO, J.A, Luz AB. Separação magnética e eletrostática. In: Luz AB, Sampaio JA, Almeida SLM. Tratamento de Minérios. 4a ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004, p. 303-335.

SEBRAE. Ferramenta 5W2H. Disponível em: <http://www.trema.gov.br/qualidade/cursos/5w_2h.pdf>. Acesso em: 14.nov.2010.

SVOBODA, J; FUJITA, T. Innovation in magnetic techniques of material treatment: technology at a crossroad. Proceeding of the XXII International Mineral Processing Congress, Lorenzen, L. (Ed.), p. 261-269, Cape Town, South Africa, 2003.

VOITTO TREINAMENTO E DESENVOLVIMENTO. Treinamento de Green Belts em Lean Seis Sigma. Apostila do treinamento, rev. 15, 2014.

WERKEMA, C. Lean Seis Sigma: Introdução às Ferramentas do Lean Manufacturing. Belo Horizonte: Desenvolvimento, 2006.

WERKEMA, C., 2004. Criando a Cultura Seis Sigma. Belo Horizonte: Werkema Editora.

WERKEMA, Cristina. Criando a Cultura Lean Seis Sigma. Elsevier Brasil, 2012.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T.; ROOS, D. A máquina que mudou o mundo. 17ª Edição. 332 p. Rio de Janeiro. 1992.

TRZASKOS, Barbara; ALKMIM, Fernando Flecha; ZAVAGLIA, Guilherme. Arcabouço estrutural e microestruturas do minério de ferro da jazida Casa de Pedra, Quadrilátero Ferrífero, MG. Brazilian Journal of Geology, v. 41, n. 3, p. 486-497, 2011.